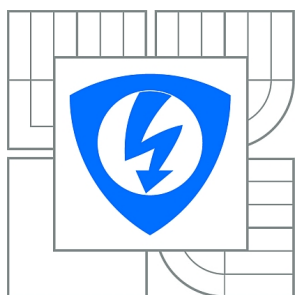


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

ALGORITMY ŘÍZENÍ TOPNÉHO ČLÁNKU TEPELNÉHO HMOTNOSTNÍHO PRŮTOKOMĚRU

THERMAL MASS FLOW-METER HEATING ELEMENT CONTROL ALGORITHMS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

ADAM CHROMÝ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. PAVEL VÁCLAVEK, Ph.D.

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Automatizační a měřicí technika

Student: Adam Chromý

ID: 115187

Ročník: 3

Akademický rok: 2010/2011

NÁZEV TÉMATU:

Algoritmy řízení topného článku tepelného hmotnostního průtokoměru

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte s funkcí EMS51 a EMS60 - tepelného hmotnostního průtokoměru. Sestavte matematický model průtokoměru a navrhnete možné metody řízení topného článku průtokoměru tak, aby bylo dosaženo zlepšení dynamických vlastností. Chování navržených algoritmů ověřte simulačně a v případě možnosti i praktickým experimentem.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Čermák J, Kučera J. 1981. The compensation of natural temperature gradient in the measuring point during the sap flow rate determination in trees. *Biologia Plantarum* (Praha) 23, 469-471.

Další dle pokynů vedoucího práce a konzultanta.

Termín zadání: 7.2.2011

Termín odevzdání: 23.5.2011

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

prof. Ing. Pavel Jura, CSc.
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Práce se zabývá měřícím zařízením EMS62, jehož měřicí metoda vychází z regulace teploty. Cílem práce je vytvoření simulačních modelů regulované soustavy a částí zařízení EMS62, které jsou zapojeny do regulační smyčky. Dalším cílem je odhalení chyb, kterých se dopustil konstruktér a návrh jejich řešení. Práce také analyzuje stabilitu regulační smyčky a navrhuje další algoritmy regulace. Veškeré výsledky jsou využitelné při dalším vývoji přístroje.

KLÍČOVÁ SLOVA

měřicí přístroj EMS62, časově variantní systém, transpirační proud, stabilita, linearizace, regulátor, robustní řízení, reléová regulace

ABSTRACT

Subject of this thesis is measuring instrument EMS62 based on temperature control. The aim of this thesis is building simulation models of controlled system and important parts of EMS62. Next aims are error detection with draft of solution, stability analysis and new controlling algorithms development. Results of this thesis are usable for future innovation.

KEYWORDS

measuring instrument, time-variant system, sap flow, stability, linearization, controller, robust control, relay-based control

CHROMÝ, Adam *Algoritmy řízení topného článku tepelného hmotnostního průtokoměru*: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky, 2011. 57 s. Vedoucí práce byl doc. Ing. Pavel Václavek, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Algoritmy řízení topného článku tepelného hmotnostního průtokoměru“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

Brno

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu mé bakalářské práce doc. Ing. Pavlu Václavkovi, CSc. za velmi vstřícný přístup, odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce. Dále děkuji Ing. Jiřímu Kučerovi za téma této práce a za poskytnutí prostředků k jejímu vytvoření.

OBSAH

Úvod	11
1 Tepelné hmotnostní průtokoměry	12
1.1 Základní principy	12
1.2 Princip kalorimetrického hmotnostního senzoru	12
1.3 Měřicí zařízení EMS62	13
1.3.1 Princip měření transpiračního proudu	13
1.3.2 Konstrukce	14
1.3.3 Použití	16
2 Konstrukce modelu regulované soustavy	17
2.1 Pojem regulovaná soustava	17
2.2 Teoretický výpočet modelu	17
2.2.1 Model subsystému kůry	17
2.2.2 Model subsystému dřeva	18
2.2.3 Operátorový přenos regulované soustavy	20
2.3 Experimentální určení parametrů soustavy	20
2.3.1 Realizace experimentu	20
2.3.2 Naměřená data	21
2.4 Výpočet rozsahu parametrů	25
2.4.1 Rozsah časové konstanty kůry	25
2.4.2 Rozsah časové konstanty dřeva	26
2.4.3 Rozsah zesílení dřeva	27
2.5 Výsledný model regulované soustavy	28
2.5.1 Model pro MATLAB Simulink	29
3 Konstrukce modelu zařízení EMS62	30
3.1 Definice pojmů	30
3.2 Model termočlánku	30
3.3 Model regulátoru	31
3.3.1 Operátorový přenos standardizace	31
3.3.2 Operátorový přenos regulačního algoritmu	31
3.4 Model topného tělesa	32
3.5 Model linearizační funkce	33
3.6 Model zařízení EMS62	35

4	Analýza a oprava problémů stávajícího zařízení	36
4.1	Detekce problémů	36
4.2	Oprava anti wind-upu	37
4.3	Oprava přetékání proměnné	38
4.4	Oprava linearizační funkce	40
4.5	Srovnání stávajícího a opraveného zařízení EMS62	41
5	Stabilita regulačního obvodu	43
5.1	Určení stability pomocí Charitonových polynomů	43
5.2	Určení stability pomocí Hurwitzova kritéria	45
5.3	Shrnutí	46
6	Návrh nového regulačního algoritmu	47
6.1	Reléový regulátor	47
6.2	Vícestavový reléový regulátor	48
6.3	Rekonstrukce průtoku z dodávaného výkonu	50
6.3.1	Číslicová filtrace s pevným krokem	50
6.3.2	Číslicová filtrace s plovoucím krokem	51
6.4	Shrnutí	52
7	Závěr	54
	Literatura	55
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	56

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Schéma uspořádání kalorimetrického hmotnostního senzoru	13
1.2	Schéma měřicího ústrojí	14
1.3	Blokové uspořádání základních částí zařízení EMS62	15
1.4	Osmikanálové měření transpiračního proudu [1]	16
2.1	Schematické znázornění regulačního obvodu	17
2.2	Zapojení experimentální soustavy	21
2.3	Odezva na skok výkonu do větve o průměru 6 mm (měření 1)	22
2.4	Odezva na skok výkonu do větve o průměru 6 mm (měření 2)	22
2.5	Odezva na skok výkonu do větve o průměru 12 mm (měření 1)	23
2.6	Odezva na skok výkonu do větve o průměru 12 mm (měření 2)	23
2.7	Odezva na skok výkonu do větve o průměru 20 mm (měření 1)	24
2.8	Odezva na skok výkonu do větve o průměru 20 mm (měření 2)	24
2.9	Model soustavy v programu MATLAB Simulink.	29
3.1	Schematické znázornění regulačního obvodu	30
3.2	Schematické znázornění vnitřního uspořádání regulátoru	31
3.3	Přechodová charakteristika regulačního algoritmu	32
3.4	Průběh linearizační funkce	34
3.5	Průběh linearizační funkce - detail	34
4.1	Odezva zařízení EMS62 na skok žádané hodnoty	36
4.2	Odezva zařízení EMS62 na skok žádané hodnoty po opravě anti wind-upu včetně detailu	38
4.3	Odezva zařízení EMS62 na skok žádané hodnoty po opravě přetečení	39
4.4	Průběh nové linearizační funkce s vyznačenými linearizačními body	40
4.5	Odezva zařízení EMS62 na skok žádané hodnoty po opravě linearizační funkce	41
4.6	Srovnání výsledků měření stávajícího (modře) a opraveného (červeně) zařízení EMS62 se simulovaným průběhem Q_m (zeleně).	42
6.1	Srovnání kvality regulace stávajícího (modře), opraveného (červeně) a navrženého reléového regulátoru (fialově)	48
6.2	Model vícestavového reléového regulátoru v MATLAB Simulinku	49
6.3	Srovnání kvality regulace opraveného (červeně), reléového (fialově) a vícestavového reléového regulátoru (modře)	50
6.4	Srovnání výsledku měření stávajícího zařízení EMS62 (modře) a zařízení EMS62 s vícestavovým reléovým regulátorem a číslicovou filtrací s pevným krokem (červeně) se simulovaným průběhem Q_m (zeleně)	51

- 6.5 Srovnání výsledku měření stávajícího zařízení EMS62 (modře) a zařízení EMS62 s vícestavovým reléovým regulátorem a číslicovou filtrací s plovoucím krokem (červeně) se simulovaným průběhem Q_m (zeleně) 52

SEZNAM TABULEK

2.1	Přehled identifikovaných parametrů přenosové funkce	25
3.1	Linearizační tabulka	33

ÚVOD

Cílem této práce je nejprve analyzovat činnost zařízení EMS62, které je určeno pro měření transpiračního proudu¹ ve větvích o průměru 6 - 20 mm. Dle informací výrobce za předem neznámých podmínek průběh naměřeného průtoku neodpovídá skutečnému transpiračnímu proudu. Mým cílem je identifikovat příčinu tohoto problému, navrhnout řešení a pokud je to možné, realizovat i úpravu zařízení.

Dalším cílem je vytvořit matematický model regulátoru a dalších prvků zařízení EMS62 podílejících se na regulaci, a dále matematický model regulované soustavy. Určit a na těchto modelech ověřit podmínky pro parametry regulátoru, aby byl regulační obvod stabilní. Tyto poznatky a matematické modely pak mohou být užitečné při dalším vývoji měřicího zařízení EMS62.

Posledním cílem této práce je optimalizace měřicího procesu zařízení. Princip měření je založen na regulaci teploty v měřené části větve, takže mým úkolem je navrhnout nový regulační algoritmus, který by předčil stávající algoritmus v kritériu minimálního součtu odchylek regulované veličiny od žádané hodnoty po celý průběh měření.

¹Transpirační proud = proudění vody s rozpuštěnými anorganickými látkami dřevní částí cévních svazků od kořenů nahoru [2]

1 TEPELNÉ HMOTNOSTNÍ PRŮTOKOMĚRY

Měření průtoku patří mezi nejčastěji měřené veličiny, takže existuje mnoho různých snímačů pracujících na rozdílných fyzikálních principech. Protože se v našem případě jedná o proudění uvnitř dřevní hmoty, není možné použít snímače pracující na principu přímého kontaktu s tekutinou, tedy čidla objemová, rychlostní, s deformačním členem, průřezová, plováková a podobná. Nelze také užít čidla indukční nebo ultrazvuková, protože proudění probíhá formou předávání tekutiny z jedné buňky dřevní hmoty do druhé [9]. V úvahu tedy přichází pouze měření průtoku tepelným hmotnostním průtokoměrem.

1.1 Základní principy

Tepelné hmotnostní průtokoměry využívají při měření průtoku vliv proudění tekutiny na rozložení teploty těles, která jsou ve styku s proudící kapalinou. Podle uspořádání měřicího systému a podle charakteru tepelného působení je dělíme na dva typy:

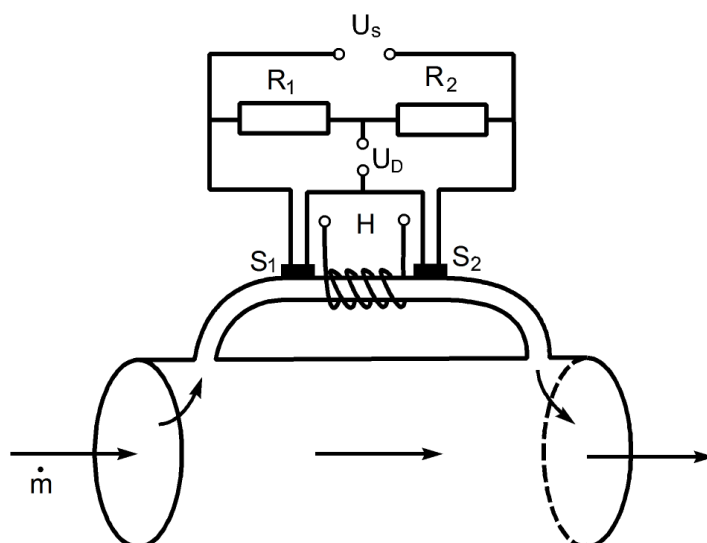
- **hmotnostní termoanemometry** – využívají chladičí účinek proudící tekutiny na vyhřívané čidlo
- **kalorimetrické hmotnostní senzory** – využívají oteplení čidla způsobené prouděním ohřáté tekutiny

Měřicí zařízení EMS62 využívá principu kalorimetrického hmotnostního senzoru, proto jeho princip dále rozvineme.

1.2 Princip kalorimetrického hmotnostního senzoru

Kalorimetrický hmotnostní sensor využívá oteplení čidla způsobené prouděním ohřáté tekutiny. Nejčastěji bývá vytvořen na tenkostěnné kapiláře, kterou proudí část tekutiny. Typické uspořádání je znázorněno na obrázku 1.1.

Kapilára je ohřívána topným tělesem H (nejčastěji odporového charakteru) a teplota stěny je měřena pomocí snímačů teploty S_1 a S_2 . Pokud kapilárou neproudí žádná tekutina, je šíření tepla z tělesa H k symetricky umístěným snímačům shodné a teplota snímačů S_1 a S_2 bude tedy také shodná. Bude-li však průtokoměrem procházet i velmi malé proudění tekutiny, dojde k porušení symetrického rozložení teploty podél kapiláry a na Wheatstoneově můstku vznikne nenulové napětí U_D . [10]



Obr. 1.1: Schéma uspořádání kalorimetrického hmotnostního senzoru

1.3 Měřicí zařízení EMS62

Vodní provoz rostlin patří mezi nejdůležitější fyziologické procesy, zejména proto, že přes něj prochází naprostá většina rostlinami přijaté energie a voda je nejčastějším přírodním limitujícím faktorem růstu. Nejvhodnějším z měřitelných parametrů je transpirační proud¹ [2]. První verzi měřicího zařízení pro měření transpiračního proudu ve větvích a stoncích do průměru 20 mm uvedla firma EMS Brno již v roce 1992. V průběhu dalších let bylo zařízení zdokonalováno a inovováno až do nynější podoby přístroje, která nese označení EMS62. Zařízení je prodáváno a používáno zákazníky po celém světě.

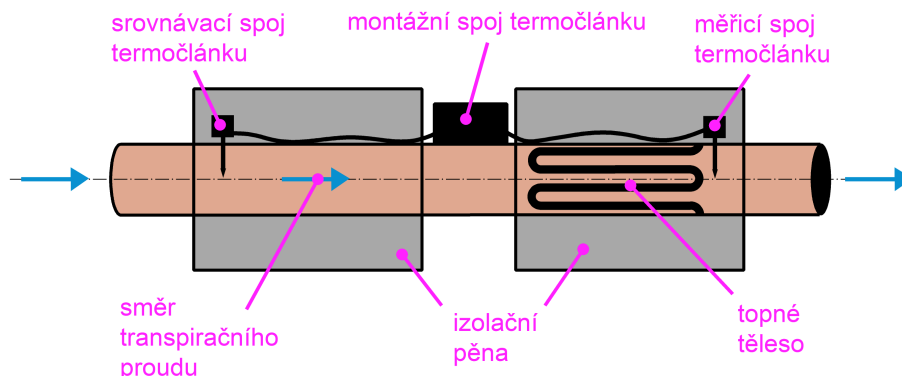
1.3.1 Princip měření transpiračního proudu

Měření transpiračního proudu v zařízení EMS62 je založeno na Metodě tepelné bilance kmene s přímým elektrickým ohřevem pletiv a vnitřním měřením teploty [1]. Tato metoda vychází z principu, že určité místo kmene, které je známým výkonem ohříváno je současně transpiračním proudem ochlazováno.

Do měřené části větve je umístěn termočlánek, jehož srovnávací spoj je umístěn ve stejné větvi ve vzdálenosti 60 mm v podélném směru. Napětí vzniklé na výstupu termočlátku je tedy úměrné rozdílu teplot mezi začátkem a koncem měřiště (ΔT).

¹Transpirační proud = proudění vody s rozpuštěnými anorganickými látkami dřevní částí cévních svazků od kořenů nahoru

Mezi měřicím a srovnávacím spojem je ke stonku přitisknuta soustava několika paralelně vedených odporových drátů o celkovém odporu 100Ω , které do měřičště dodávají tepelný výkon P . Měřicí ústrojí je schematicky znázorněno na obrázku 1.2.



Obr. 1.2: Schéma měřicího ústrojí

Regulátor v zařízení EMS62 se snaží udržet konstantní hodnotu ΔT pomocí akčního zásahu P . Tepelnou bilanci v měřičšti pak popisuje rovnice:

$$P = Q_m \cdot \Delta T \cdot c + \Delta T \cdot z \quad (1.1)$$

kde Q_m je transpirační proud [$kg \cdot s^{-1}$], c je měrná tepelná kapacita dřevní části větve [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$] a z je koeficient tepelných ztrát v měřičšti při nulové hodnotě Q_m [$W \cdot K^{-1}$].

Z rovnice 1.1 pak můžeme odvodit vztah mezi teplem P a transpiračním proudem Q_m :

$$Q_m = \frac{P}{c \cdot d \cdot \Delta T} - \frac{z}{c} \quad (1.2)$$

kde d je průměr dřevní části větve.

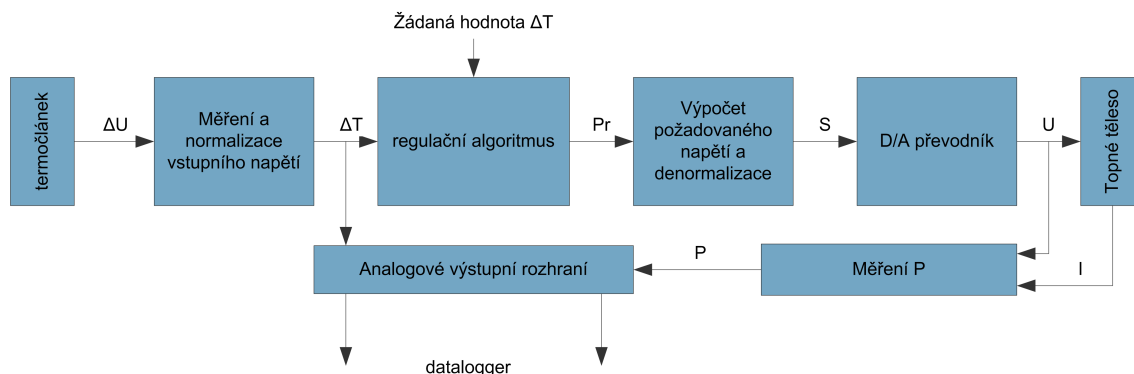
Měřicí zařízení EMS62 ve své konstrukci nezohledňuje existenci tepelných ztrát. Tyto ztráty se v naměřených hodnotách projevují jako fiktivní transpirační proud, který se přičítá k reálnému transpiračnímu proud. Toto je ošetřeno až při postprocessingu dat v dodávaného programu, který považuje nejmenší naměřené hodnoty za ekvivalentní nulovému průtoku a veškeré výsledky na tuto hodnotu zkalibruje [1].

Z výše uvedených poznatků vyplývá, že na přesnost měření má velmi zásadní vliv přesnost regulace na konstantní ΔT , zejména regulační odchylka v každém okamžiku měření. Přechodný děj po zapnutí přístroje zde není až tak podstatný.

1.3.2 Konstrukce

Základním prvkem zařízení EMS62 je mikrokontrolér, který je umístěn na desce plošných spojů společně s periferiemi, které zajišťují:

- vzorkování napětí na termočlánek (A/D převodník²)
- generování výstupního napětí na topném tělese (D/A převodník³)
- měření okamžitého napětí a proudu na topném tělese (pro výpočet dodaného výkonu)
- komunikaci s datalogerem pomocí analogového napěťového výstupu



Obr. 1.3: Blokové uspořádání základních částí zařízení EMS62

Blokové schéma podstatných částí zařízení je zobrazeno na obrázku 1.3. Termočlánek prezentuje detekovaný rozdíl teploty jako napětí ΔU , které je vzorkováno A/D převodníkem a dále v programu mikrokontroléru převáděno na inženýrské jednotky (ΔT). Regulační algoritmus na základě znalosti žádané a měřené hodnoty ΔT určí požadovaný akční zásah (P). Z něj a znalosti odporu topného tělesa R_t je vypočteno požadované napětí U , které je generováno D/A převodníkem.

Výpočet výkonu dodávaného topným tělesem je prováděn nezávisle na regulačním algoritmu. Měřicí obvody měří okamžité hodnoty napětí a proudu a z něj počítají okamžitý výkon. Ten je poté (společně s měřeným ΔT) přenášen pomocí analogového napěťového rozhraní do dataloggeru EMS EdgeBox⁴, který přijatý napěťový signál převádí na hodnotu transpiračního proudu Q_m v jednotkách $kg \cdot h^{-1}$ [3]. Zařízení je také vybaveno sériovým rozhraním RS232, které primárně slouží k justování a kalibraci přístroje výrobcem, je však možné jej použít také pro výstup měřených hodnot ve formě textového řetězce. Častější a výrobcem doporučené užití je však v kombinaci s dataloggerem.

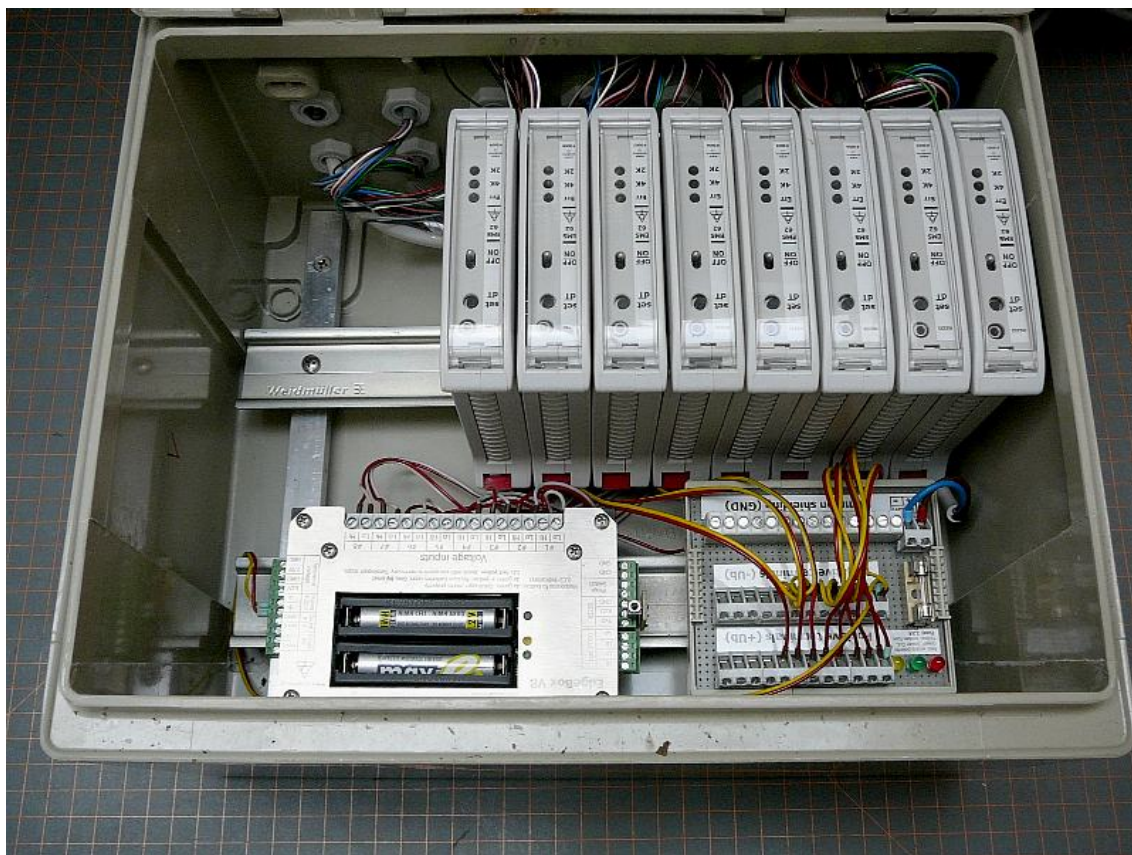
²analogově-digitální převodník

³digitálně-analogový převodník

⁴Vícekanálový datalogger, který je schopen v nastavené periodě vzorkovat napěťový signál a ukládat naměřené hodnoty do vestavěné paměti. Umožňuje i odesílání dat v reálném čase přes sériovou linku v podobě textového řetězce. Výrobek EMS Brno

1.3.3 Použití

Přístroj obsahuje pouze jeden měřicí kanál, neobsahuje úložiště dat a napájecí zdroj. Nepředpokádá se tedy jeho samostatné provozování a proto jeho pouzdro není voděodolné. Je navrženo pro montáž na DIN lištu společně s několika dalšími přístroji stejného typu, napájecím zdrojem, bateriemi a dataloggerem. Celá měřicí soustava je pak umístěna ve vodotěsném boxu. Na obrázku 1.4 je pro ilustraci znázorněna soustava pro měření osmi transpiračních proudů se společným dataloggerem.



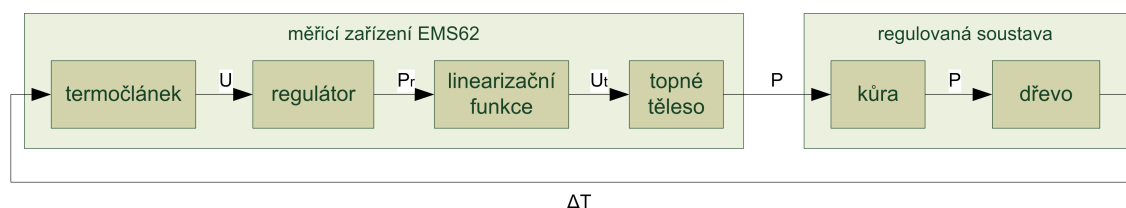
Obr. 1.4: Osmikanálové měření transpiračního proudu [1]

2 KONSTRUKCE MODELU REGULOVANÉ SOUSTAVY

Cílem této kapitoly je vytvořit model regulované soustavy, který by mohl být užitečný při dalším vývoji zařízení, a to nejprve pomocí teoretických výpočtů z fyzikálních vztahů, které danou soustavu popisují. Následně pak experimentálně změřit odezvu soustavy na jednotkový skok a z ní pomocí identifikačních metod určit model. Poté srovnat oba výsledky.

2.1 Pojem regulovaná soustava

Pro účely vytvoření modelu považujeme za regulovanou soustavu spojitý dynamický systém s jedním vstupem, kterým je dodávaný tepelný výkon P , a jedním výstupem, kterým je rozdíl teplot mezi měřicím a srovnávacím spojem termočlánku ΔT . Rozsah a pozice regulované soustavy v regulačním obvodu jsou znázorněny na obrázku 2.1.



Obr. 2.1: Schematické znázornění regulačního obvodu

2.2 Teoretický výpočet modelu

Regulovanou soustavu je možné rozdělit na sériové spojení dvou subsystémů – kůry a dřeva. Subsystém kůry charakterizuje přenos tepelného výkonu z povrchu větve na rozhraní mezi kůrou a dřevem. Subsystém dřeva pak charakterizuje tepelnou bilanci dřevní části větve.

2.2.1 Model subsystému kůry

Model kůry charakterizuje vedení tepla z povrchu kůry na rozhraní mezi kůrou a dřevem a dále pak dřevem do osy větve, kde je umístěn termočlánek. Do systému vstupuje výkon dodaný topným tělesem, výstupem je výkon dodávaný do dřeva. Pro zjednodušení uvažujeme, že zde dochází ke ztrátám energie, které jsou zanedbatelné vzhledem k mnohonásobně vyšším ztrátám v dřevní části.

Bilanční rovnice tepla [7] v kůře má tedy tvar:

$$Q_d - Q_{out} = Q_{ak} \quad (2.1)$$

kde Q_d je teplo dodané topným tělesem [J], Q_{out} je teplo předané do dřevní části větve [J] a Q_{ak} je teplo akumulované v kůře [J].

Pro jednotlivé členy rovnice 2.1 platí:

$$Q_d = P \cdot dt \quad (2.2)$$

$$Q_{out} = \lambda_k \cdot S_k \cdot \frac{\Delta T_k}{x_k} \cdot dt \quad (2.3)$$

$$Q_{ak} = m_k \cdot c_k \cdot d\Delta T_k \quad (2.4)$$

kde P je výkon topného tělesa [W], λ_k je tepelná vodivost kůry [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$], S_k je povrch kůry na který působí P [m^2], ΔT_k je rozdíl teplot mezi povrchem kůry a rozhraním kůry a dřevní části větve [K], x_k je tloušťka kůry [m], m_k je hmotnost kůry [kg] a c_k je měrná tepelná kapacita kůry [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$].

Dosažením rovnic 2.2, 2.3 a 2.4 do 2.1 získáváme stavové rovnice ve tvaru:

$$\frac{d\Delta T_k}{dt} = -\frac{\lambda_k \cdot S_k}{m_k \cdot c_k \cdot x_k} \Delta T_k + \frac{1}{m_k \cdot c_k} P \quad (2.5)$$

$$P_{out} = \frac{\lambda_k \cdot S_k}{x_k} \Delta T_k \quad (2.6)$$

Vzhledem k tomu, že jsou obě stavové rovnice lineární, můžeme model kůry popsat operátorovým přenosem $F_1(p)$, který plyne ze stavových rovnic a má tvar:

$$F_1(p) = \frac{1}{T_{F1}p + 1} \quad (2.7)$$

$$T_{F1} = \frac{m_k \cdot c_k \cdot x_k}{\lambda_k \cdot S_k} \quad (2.8)$$

Zesílení soustavy je rovno 1, což odpovídá teoretickým předpokladům, neboť byly veškeré ztráty v kůře zanedbány. Soustava bude mít setrvačný charakter s časovou konstantou T_{F1} , jejíž velikost je závislá na geometrických rozměrech kůry, na tepelné vodivosti a měrné tepelné kapacitě materiálu, kterým je kůra tvořena. Dle [4] se λ_k a c_k pohybuje pouze v úzkém rozsahu hodnot (λ_k : 0,12 – 0,18 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$, c_k : 1350 – 1850 $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$), takže tato časová konstanta závisí zejména na geometrických rozměrech kůry. Rozsah možných T_{F1} bylo tedy možné změřit experimentálně (viz. kapitola 2.3).

2.2.2 Model subsystému dřeva

Dřevní část větve je ohřívána topným tělesem a současně ochlazována transpiračním proudem. Bilanční rovnice tepla [7] v dřevní části větve má tedy tvar:

$$Q_{in} + Q_d - Q_{out} - Q_z = Q_{ak} \quad (2.9)$$

kde Q_{in} je teplo, které přináší transpirační proud do měřiče $[J]$, Q_{out} je teplo, které je transpiračním proudem odnášeno z měřiče $[J]$, Q_z ztráta tepla vedením $[J]$, Q_d je teplo dodané topným tělesem $[J]$ a Q_{ak} je teplo, které je akumulováno v měřiči $[J]$ a které se projeví zvýšením ΔT .

Pro jednotlivé členy rovnice 2.9 platí:

$$Q_{in} = Q_m \cdot c \cdot T_1 \cdot dt \quad (2.10)$$

$$Q_{out} = Q_m \cdot c \cdot T_2 \cdot dt \quad (2.11)$$

$$Q_z = z \cdot \Delta T \cdot dt \quad (2.12)$$

$$Q_d = P \cdot dt \quad (2.13)$$

$$Q_{ak} = k_z \cdot m \cdot c \cdot d\Delta T \quad (2.14)$$

$$\Delta T = T_2 - T_1 \quad (2.15)$$

kde c je měrná tepelná kapacita dřevní části větve $[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$, m je hmotnost dřevní části měřiče $[kg]$, T_1 je teplota části větve před ohřevem topným tělesem $[K]$, T_2 je teplota části větve po průchodu měřičem $[K]$, z jsou tepelné ztráty v měřiči způsobené vedením tepla $[W \cdot K^{-1}]$ a k_z koeficient tepelných ztrát v měřiči $[-]$.

Dosazením rovnic 2.10, 2.11, 2.12, 2.13, 2.14 a 2.15 do rovnice 2.9 získáváme stavovou rovnici ve tvaru:

$$\frac{d\Delta T}{dt} = -\frac{Q_m \cdot c + z}{m \cdot c} \Delta T + \frac{1}{k_z \cdot m \cdot c} P \quad (2.16)$$

Vzhledem k tomu, že je stavová rovnice 2.16 lineární, můžeme model dřeva popsat operátorovým přenosem $F_2(p)$:

$$F_2(p) = \frac{K_{F2}}{T_{F2}p + 1} \quad (2.17)$$

$$T_{F2} = \frac{m \cdot c}{Q_m \cdot c + z} \quad (2.18)$$

$$K_{F2} = \frac{k_z^{-1}}{Q_m \cdot c + z} \quad (2.19)$$

Z rovnice 2.17 plyne, že transpirační proud Q_m bude výrazně ovlivňovat statické i dynamické vlastnosti soustavy. S rostoucím Q_m bude klesat T_{F2} i K_{F2} . Z důvodů výskytu ztrátového koeficientu z v přenosu soustavy, bude v případě nulového Q_m přístrojem naměřen zdánlivý transpirační proud. Veškeré naměřené hodnoty budou tedy posunuty o $z \cdot c^{-1}$. Tento zdánlivý transpirační proud se odečítá při postprocesingu v dodávaném software, takže není nutné se tím zabývat. Parametry soustavy jsou kromě Q_m ovlivněny i geometrickými rozměry měřiče. Dle [4] se c pohybuje pouze v úzkém rozsahu hodnot (2620 – 2850 $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$), takže tato časová konstanta závisí zejména na geometrických rozměrech měřiče a Q_m .

2.2.3 Operátorový přenos regulované soustavy

Protože model kůry je časově invariantní lineární model prvního řádu (viz. kapitola 2.2.1) a model dřeva je časově variantní lineární model prvního řádu (viz. kapitola 2.2.2), sériovým spojením těchto modelů získáváme časově variantní lineární model druhého řádu, který je popsán operátorovým přenosem:

$$F(p) = \frac{K_{F2}}{(T_{F1}p + 1)(T_{F2}p + 1)} \quad (2.20)$$

kde pro jednotlivé parametry platí:

$$T_{F1} = \frac{m_k \cdot c_k \cdot x_k}{\lambda_k \cdot S_k} \quad (2.21)$$

$$T_{F2} = \frac{m \cdot c}{Q_m \cdot c + z} \quad (2.22)$$

$$K_{F2} = \frac{k_z^{-1}}{Q_m \cdot c + z} \quad (2.23)$$

2.3 Experimentální určení parametrů soustavy

Zesílení soustavy a jednotlivé časové konstanty závisí na mnoha parametrech, které nemůžeme teoretickým výpočtem exaktně určit. Z výše uvedených poznatků však víme, že reálnou soustavu bude nejspíše možné aproximovat přenosovou funkcí druhého řádu. Odměření přechodové charakteristiky systému pro největší (20 mm), střední (12 mm) a nejmenší (6 mm) možný průměr tak můžeme určit možný rozsah parametrů T_{F1} , T_{F2} a K_{F2} při $Q_m = 0$.

2.3.1 Realizace experimentu

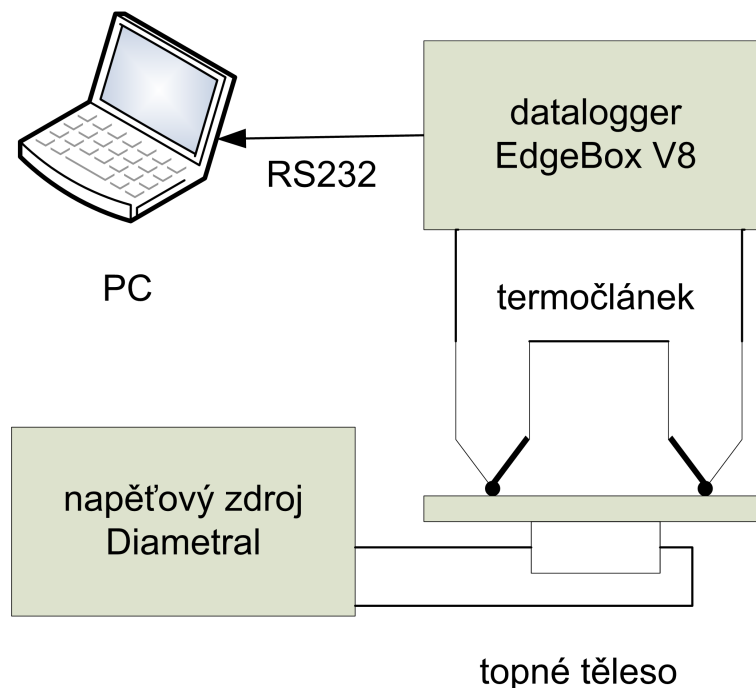
Praktické měření probíhalo na větvi, která byla čerstvě uříznuta ze stromu, takže její vlastnosti byly téměř identické s živou větví, vyjma transpiračního proudu Q_m , jehož hodnota byla při tomto měření nulová. Do větve byly navrtány otvory pro měřicí a srovnávací spoj termočlátku a obě místa byla následně zakryta jako na obrázku 1.2.

Vstupním signálem byl skok z nuly na konstantní hodnotu výkonu odpovídající napětí 3,00 V, který působil na topné těleso rezistorového charakteru o odporu $R_t = 100,6 \Omega$. Vstupní výkon do soustavy byl tedy roven:

$$P(t) = \begin{cases} 0 & t = 0 \\ \frac{U^2}{R_t} = \frac{3^2}{100,6} = 89,4 \text{ mW} & t \in (0; \infty) \end{cases} \quad (2.24)$$

Zdrojem konstantního výkonu byl stabilizovaný napěťový zdroj Diametral V130R50D. Časový průběh měřeného výstupního napětí z termočlátku byl zaznamenáván na datalogger EdgeBox V8 s napěťovým vstupem, perioda vzorkování byla 2 s. Z důvodů

časové náročnosti měření byly změřeny pouze 2 odezvy u větve s maximálním průměrem, 2 odezvy u větve se středním průměrem a 2 odezvy u větve s minimálním průměrem. Schéma zapojení experimentální soustavy je na obrázku 2.2.

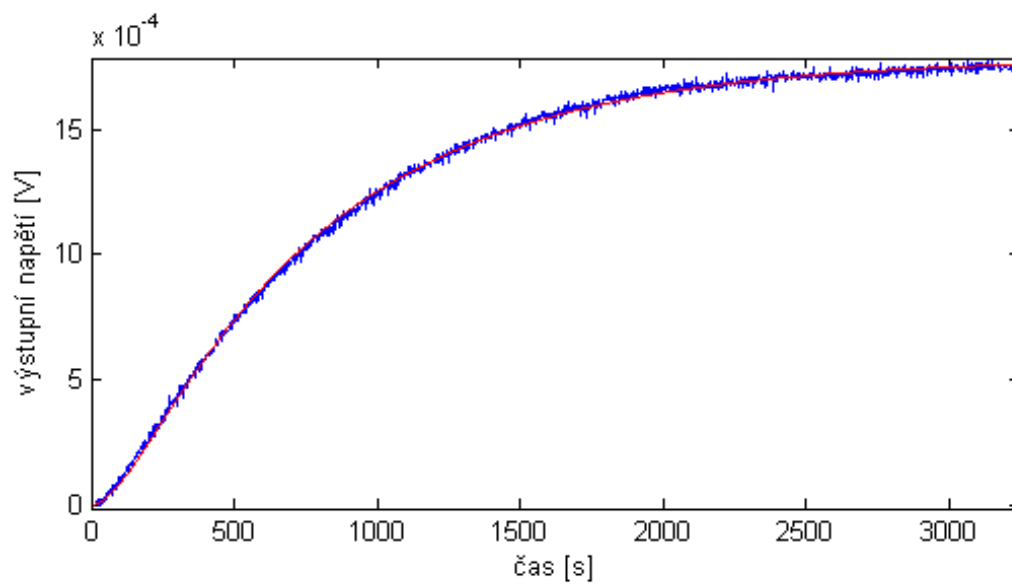


Obr. 2.2: Zapojení experimentální soustavy

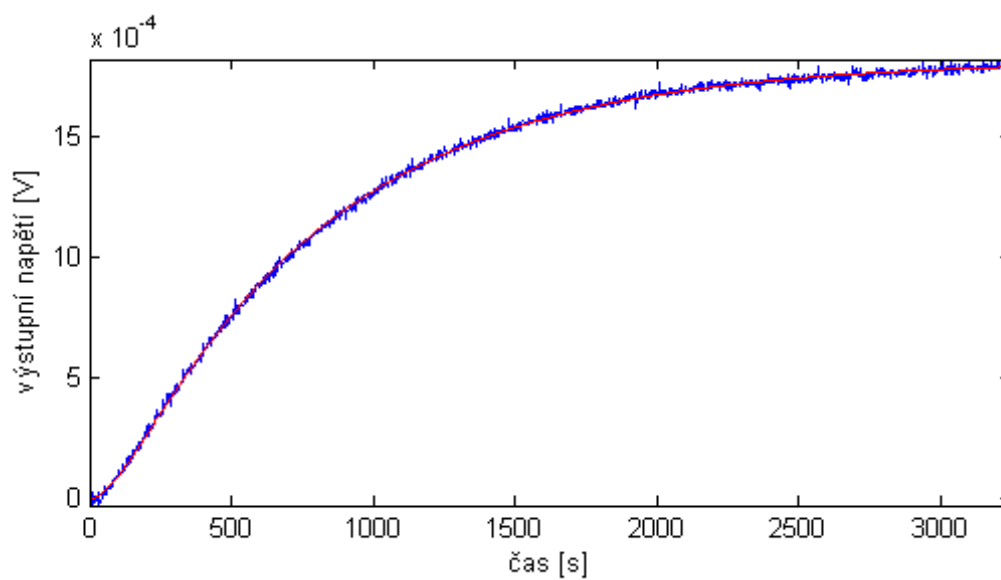
2.3.2 Naměřená data

Naměřená data jsou zobrazena modrou barvou na obrázcích 2.3 - 2.8. Z průběhu odezvy je patrné, že systém bude možné velmi přesně aproximovat modelem soustavy 2. řádu.

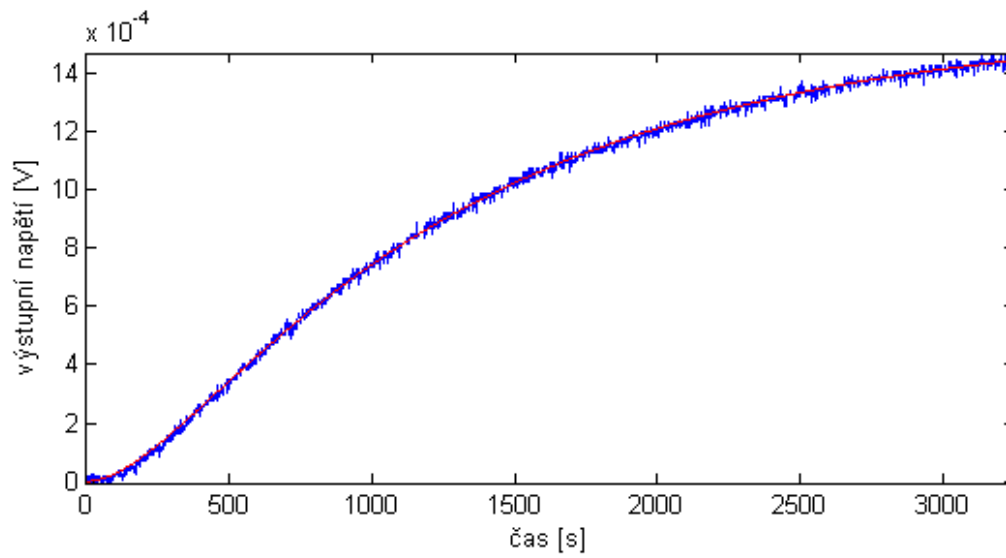
Pro každé měření tedy pomocí kvadratického kritéria a funkce `fminsearch` v programu MATLAB hledáme takovou přechodovou charakteristiku systému 2. řádu, která nejvíce odpovídá naměřenému průběhu. Výsledné křivky jsou zobrazeny na obrázcích 2.3 - 2.8 červenou barvou a jejich parametry T_{F1} , T_{F2} a K_{F2} jsou uvedeny v tabulce 2.1.



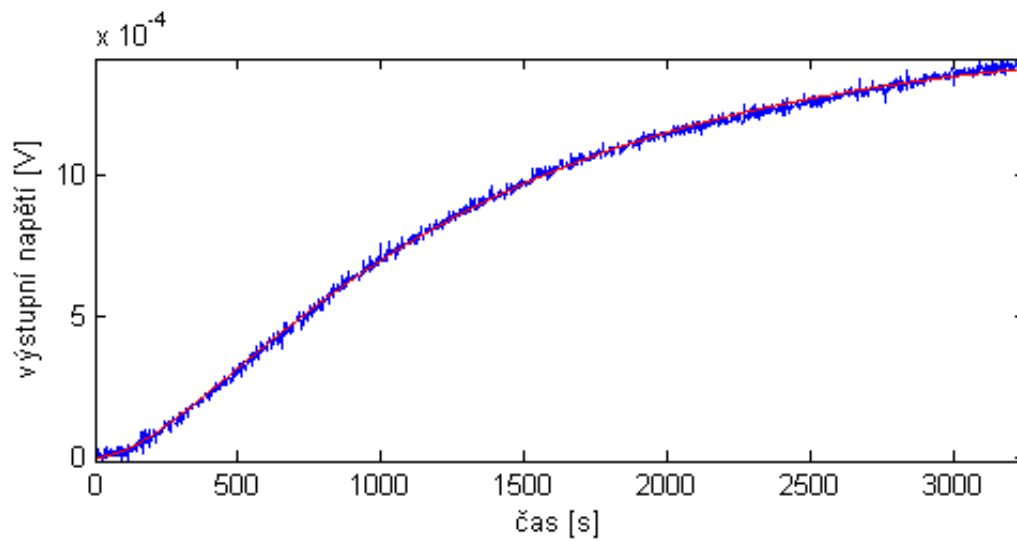
Obr. 2.3: Odezva na skok výkonu do větve o průměru 6 mm (měření 1)



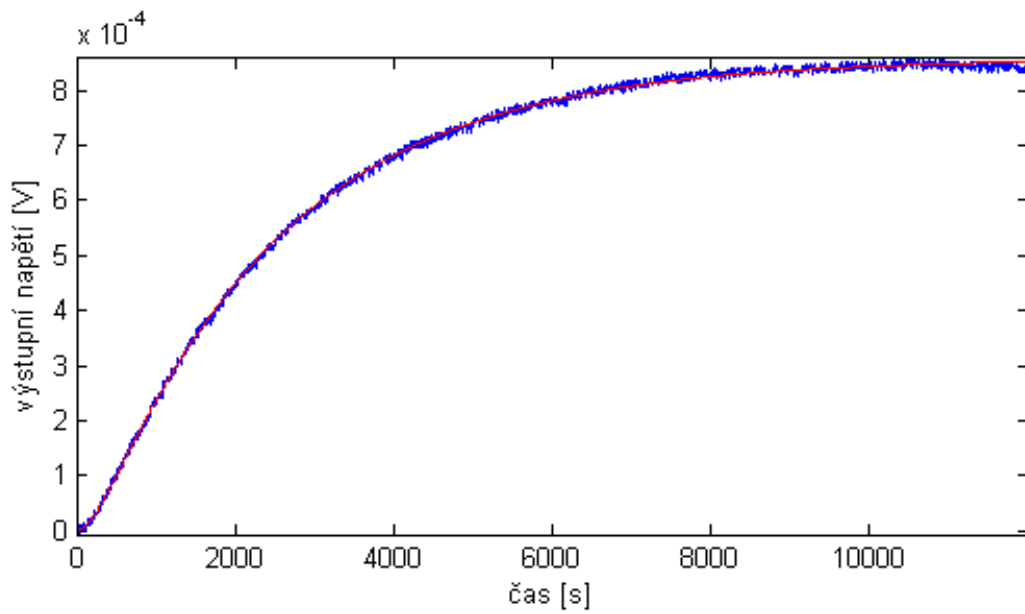
Obr. 2.4: Odezva na skok výkonu do větve o průměru 6 mm (měření 2)



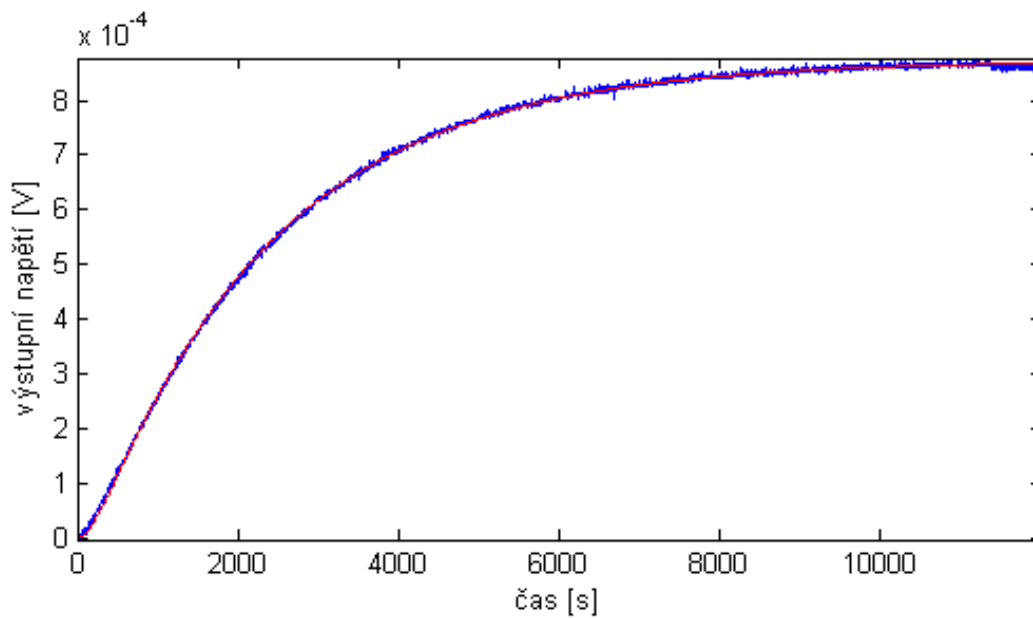
Obr. 2.5: Odezva na skok výkonu do větve o průměru 12 mm (měření 1)



Obr. 2.6: Odezva na skok výkonu do větve o průměru 12 mm (měření 2)



Obr. 2.7: Odezva na skok výkonu do větve o průměru 20 mm (měření 1)



Obr. 2.8: Odezva na skok výkonu do větve o průměru 20 mm (měření 2)

Tab. 2.1: Přehled identifikovaných parametrů přenosové funkce

	Průměr větve 6 mm		Průměr větve 12 mm		Průměr větve 20 mm	
	Měření 1	Měření 2	Měření 1	Měření 2	Měření 1	Měření 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

Jak je vidět v tabulce 2.1, časová konstanta T_{F2} roste v závislosti na průměru větve, což odpovídá předpokladům, neboť hmotnost ohřívané části větve je také průměrově závislá.

Hodnota zesílení K_{F2} je nepřímo úměrná ztrátovému koeficientu k_z , který s rostoucím průměrem narůstá, což také odpovídá předpokladům.

Průběh hodnot časové konstanty T_{F1} v závislosti na průměru větve má nejprve rostoucí charakter, který je následován klesajícím průběhem. Pokud opravdu časová konstanta charakterizuje kůru na povrchu větve, pak si tento jev můžeme vysvětlit tak, že rychlost růstu kůry u starších větví (tj. s větším průměrem) je nižší, takže přírůstek hmotnosti m_k je menší než přírůstek povrchu větve S_k . U mladších (a tedy užších) větví dochází k rychlejšímu růstu kůry, proto převažuje vliv přírůstku m_k nad vlivem přírůstku S_k .

2.4 Výpočet rozsahu parametrů

Při experimentálním určování parametrů regulované soustavy jsme byli schopni provést měření v laboratorních podmínkách pouze u vzorků, ve kterých je aktuální hodnota transpiračního proudu $Q_m = 0$. Protože nejsme žádným způsobem schopni vyvolat ve vzorku nenulový transpirační proud, musíme určit rozsah parametrů na základě kombinace teoretických poznatků s výsledky experimentu.

2.4.1 Rozsah časové konstanty kůry

Časová konstanta T_{F1} závisí pouze na vlastnostech a množství pletiva, kterým je kůra tvořena. Je nezávislá na transpiračním proudu Q_m , takže její rozsah můžeme určit z výsledků experimentu. Musíme však brát v úvahu, že časová konstanta závisí na tloušťce kůry, která může být rozdílná. Na základě informací z [4] předpokládáme, že tloušťka nejtlustší kůry není větší než 1,5 násobek nejtenší kůry. Abychom

tedy dosáhli bezpečného rozsahu parametrů, rozšíříme šířku intervalu získaného experimentálně koeficientem 1,5. Výsledný rozsah T_{F1} je pak:

$$T_{F1} \in \langle 40; 280 \rangle \quad (2.25)$$

2.4.2 Rozsah časové konstanty dřeva

Hodnota časové konstanty T_{F2} je definována rovnicí 2.22, ze které plyne vztah pro maximální hodnotu T_{F2} :

$$\max T_{F2} = \frac{\max(m \cdot c)}{\min(Q_m \cdot c + z)} \quad (2.26)$$

Z toho vyplývá, že časová konstanta T_{F2} bude nabývat maximální hodnoty, když bude ve větvi s maximálním možným průměrem transpirační proud $Q_m = 0$, což je přímo jedna ze situací při experimentálním měření (viz. kapitola 2.3). Horní hranice rozsahu T_{F2} je tedy:

$$\max T_{F2} = 2600 \quad (2.27)$$

Spodní hranici rozsahu zjistíme řešením rovnice:

$$\min T_{F2} = \frac{\min(m \cdot c)}{\max(Q_m \cdot c + z)} = \frac{\min m \cdot \min c}{\max Q_m \cdot \max c + \max z} \quad (2.28)$$

Platí:

$$\min m = \min V \cdot \min \rho = \pi \cdot \frac{(\min d)^2}{4} \cdot l \cdot \min \rho \quad (2.29)$$

$$\max m = \max V \cdot \max \rho = \pi \cdot \frac{(\max d)^2}{4} \cdot l \cdot \max \rho \quad (2.30)$$

$$\min d = 6 \text{ mm} = 6 \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad (2.31)$$

$$\max d = 20 \text{ mm} = 20 \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad (2.32)$$

kde l je délka ohřívání části větve (měřiče) $[m]$ a ρ je hustota dřeva $[kg \cdot m^{-3}]$. Dle [3] je:

$$\max Q_m = 0,2 \text{ kg} \cdot h^{-1} = 5,56 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot s^{-1} \quad (2.33)$$

a dle [4] platí pro hustotu a měrnou tepelnou kapacitu živého dřeva:

$$\min \rho = 130 \text{ kg} \cdot m^{-3} \quad (2.34)$$

$$\max \rho = 1360 \text{ kg} \cdot m^{-3} \quad (2.35)$$

$$\min c = 2500 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot K^{-1} \quad (2.36)$$

$$\max c = 3271 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot K^{-1} \quad (2.37)$$

Maximální ztráty tepla vedením jsou v případě $Q_m = 0$ a maximálního možného průměru větve. Časovou konstantu pro tento případ známe z výsledku experimentu, takže z ní můžeme vypočítat hodnotu $\max z$:

$$\max z = \frac{\max m \cdot \max c}{\max T_{F2}} = \frac{0,0256 \cdot 3271}{2600} = 0,0322 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1} \quad (2.38)$$

Kombinací rovnic 2.28 - 2.38 získáme:

$$\min T_{F2} = \min f(c) \quad (2.39)$$

$$f(c) = \frac{2,21 \cdot 10^{-4} \cdot c}{5,56 \cdot 10^{-5} \cdot c + 3,22 \cdot 10^{-2}} \quad (2.40)$$

$$\frac{df(c)}{dc} = \frac{7,10 \cdot 10^{-6}}{3,09 \cdot 10^{-9} \cdot c^2 + 3,58 \cdot 10^{-6} \cdot c + 1,04 \cdot 10^{-3}} \quad (2.41)$$

Protože je derivace funkce $f(c)$ na intervalu $\langle \min c; \max c \rangle$ stále kladná, je funkce $f(c)$ na tomto intervalu stále rostoucí. Pak platí:

$$\min T_{F2} = \min f(c) = f(\min c) = 3,22 \quad (2.42)$$

Výsledný rozsah časové konstanty T_{F2} je pak tedy:

$$T_{F2} \in \langle 3,22; 2600 \rangle \quad (2.43)$$

2.4.3 Rozsah zesílení dřeva

Hodnota zesílení K_{F2} je definována rovnicí 2.23, ze které plyne vztah pro maximální hodnotu K_{F2} :

$$\max K_{F2} = \frac{k_z^{-1}}{\min(Q_m \cdot c + z)} \quad (2.44)$$

kde k_z je koeficient charakterizující ztráty v měřišti. Z toho vyplývá, že časová konstanta K_{F2} bude nabývat maximální hodnoty, když bude ve větvi s minimálním možným průměrem transpirační proud $Q_m = 0$, což je přímo jedna ze situací při experimentálním měření (viz. kapitola 2.3). Horní hranice rozsahu K_{F2} je tedy:

$$\max K_{F2} = 48 \quad (2.45)$$

Spodní hranici rozsahu zjistíme řešením rovnice:

$$\min K_{F2} = \frac{k_z^{-1}}{\max(Q_m \cdot c + z)} = \frac{k_z^{-1}}{\max Q_m \cdot \max c + \max z} \quad (2.46)$$

kde k_z^{-1} vypočteme z výsledku experimentu a rovnice 2.38:

$$\min K_{F2|Q_m=0} = \frac{k_z^{-1}}{0 \cdot c + \max z} = \frac{k_z^{-1}}{\max z} \quad (2.47)$$

$$k_z^{-1} = \max z \cdot \min K_{F2|Q_m=0} = 0,0322 \cdot 19,60 \quad (2.48)$$

$$k_z^{-1} = 6,31 \cdot 10^{-1} \quad (2.49)$$

$$k_z = 1,58 \quad (2.50)$$

Dle hodnoty koeficientu charakterizujícího ztráty v měřišti, která je vyšší než 1, se může na první pohled zdát, že na zvýšení vnitřní energie měřišť (tedy na zvýšení ΔT) se použije více tepla, než bylo akumulováno. To je způsobeno jevem, který byl pro zjednodušení v bilanční rovnici 2.9 zanedbán, ale přesto hraje významnou roli.

Podstatou vzniku transpiračního proudění je osmotický tlak¹. Čistá voda má tendenci pronikat přes buněčnou stěnu, kde je koncentrace osmoticky aktivních látek vyšší a ředit je. Tím však vznikne rozdíl koncentrací mezi krajní buňkou a buňkou, která je dále ve směru transpiračního proudu. Voda tedy postupuje do další buňky, aby její koncentraci zředila. Díky tomuto postupu vody se ale v krajní buňce opět zvýší koncentrace, a tak začne další čistá voda pronikat přes její stěnu, aby ji zředila. Výsledkem je vznik transpiračního proudu. [11]

Průchodem přes jednotlivé buněčné stěny voda předává část své vnitřní energie buňkám, což se projeví dalším zvýšením ΔT . Tento jev působí společně s přímým ohřevem měřišť topným tělesem, a proto je hodnota ztrátového koeficientu k_z vyšší než 1.

Dosažením rovnic 2.49, 2.38, 2.37 a 2.33 do rovnice 2.46 získáme:

$$\min K_{F2} = \frac{6,31 \cdot 10^{-1}}{5,56 \cdot 10^{-5} \cdot 3,27 \cdot 10^3 + 3,22 \cdot 10^{-2}} = 2,95 \quad (2.51)$$

Výsledný rozsah zesílení K_{F2} je pak tedy:

$$K_{F2} \in \langle 2,95; 48 \rangle \quad (2.52)$$

2.5 Výsledný model regulované soustavy

Na základě výsledků experimentu a předchozích výpočtů můžeme shrnout veškeré získané poznatky.

Regulovanou soustavu je možné aproximovat modelem spojitého lineárního systému druhého řádu, který má jeden vstup a jeden výstup.

¹Tlak toku rozpouštědla pronikajícího přes semipermeabilní (polopropustnou) membránu do roztoku, ve kterém je vyšší koncentrace rozpouštěných molekul nebo iontů. [11]

Operátorový přenos tohoto systému má tvar:

$$F(p) = \frac{K_{F2}}{(T_{F1}p + 1)(T_{F2}p + 1)} \quad (2.53)$$

kde:

$$T_{F1} \in \langle 40; 280 \rangle \quad (2.54)$$

$$T_{F2} \in \langle 3, 22; 2600 \rangle \quad (2.55)$$

$$K_{F2} \in \langle 2, 95; 48 \rangle \quad (2.56)$$

Parametr T_{F1} je časově invariantní a závisí na konkrétní větvi. V průběhu měření transpiračního proudu, který v ní protéká, se nemění.

Parametr T_{F2} závisí na konkrétní větvi a na velikosti transpiračního proudu jí protékajícím. Hodnota T_{F2} je úměrná velikosti Q_m nepřímo a průměru větve d přímo.

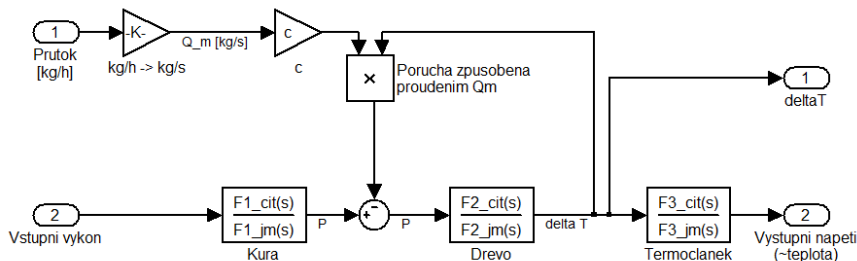
Parametr K_{F2} závisí na konkrétní větvi a na velikosti transpiračního proudu jí protékajícím. Hodnota K_{F2} je nepřímo úměrná velikosti Q_m i průměru větve d .

2.5.1 Model pro MATLAB Simulink

Pokud bychom chtěli na základě rovnic z kapitoly 2.2 sestavit takový model soustavy v programu MATLAB Simulink, který je parametrizovatelný na základě velikosti Q_m , museli bychom znát okamžité hodnoty veličin z , m a c . Protože je neznáme, spokojíme se s řešením, které sice zanedbává některé jevy, ale pro simulace a testování regulačního algoritmu naprosto dostačuje.

V tomto případě tedy budeme uvažovat soustavu druhého řádu, která má parametry $T_{F1|Q_m=0}$, $T_{F2|Q_m=0}$ a $K_{F2|Q_m=0}$, které jsou závislé pouze na vlastnostech větve a v průběhu měření se nemění. Rozsah těchto parametrů byl určen v kapitole 2.3. Působení transpiračního proudu pak budeme považovat jako poruchu působící na rozhraní kůry a dřeva, jejíž velikost je dána součinem Q_m , c a ΔT .

Model soustavy sestavený v programu MATLAB Simulink je na obrázku 2.9.



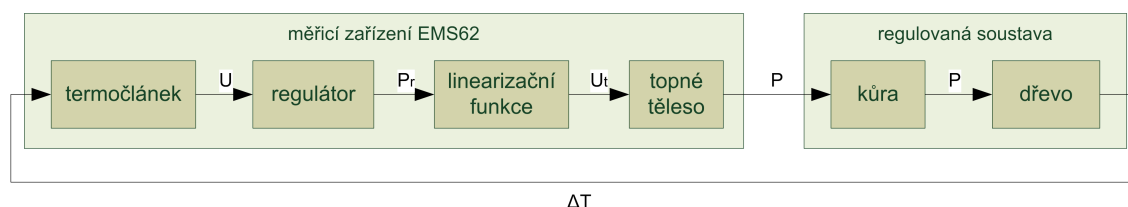
Obr. 2.9: Model soustavy v programu MATLAB Simulink.

3 KONSTRUKCE MODELU ZAŘÍZENÍ EMS62

Cílem této kapitoly je vytvořit model zařízení EMS62, který by mohl být užitečný při dalším vývoji.

3.1 Definice pojmů

Pro účely vytvoření modelu považujeme za *zařízení EMS62* spojitý dynamický systém s jedním vstupem, kterým je rozdíl teplot mezi měřicím a srovnávacím spojem termočlánek ΔT , a jedním výstupem, kterým je dodávaný tepelný výkon P . Rozsah a pozice zařízení EMS62 v regulačním obvodu jsou pro zopakování znázorněny na obrázku 3.1.



Obr. 3.1: Schematické znázornění regulačního obvodu

Zařízení EMS62 je složeno z několika sériově spojených subsystémů:

- **Termočlánek** – převádí rozdíl teplot mezi měřicím a srovnávacím spojem termočlánek ΔT na elektrické napětí U .
- **Regulátor** – jeho vstupní veličinou je napětí U , které je vzorkováno v A/D převodníku a poté přepočítáno na teplotu v Kelvinech. Ta je následně odečtena od žádané hodnoty a výsledek (regulační odchylka) je předán *regulačnímu algoritmu*, který určí velikost požadovaného výstupního výkonu P_r .
- **Linearizační funkce** – je nelineární, kompenzuje nelienaritu topného tělesa. Pomocí linearizační tabulky převádí požadovaný výkon P_r na hodnotu požadovaného napětí na topném tělese U_t , které je generováno D/A převodníkem.
- **Topné těleso** – je nelineární, vstupem je požadované napětí U_t , výstupem je tepelný výkon P .

3.2 Model termočlánek

Termočlánek slouží k měření ΔT a jeho výstupem je napětí v mikrovoltech. Dle [3] je jeho zesílení $38,61\mu V \cdot K^{-1}$ a časová konstanta 1s. Vzhledem k velkým časovým

konstantám operátorových přenosů dřeva a kůry (viz. kapitola 2.3) můžeme jeho dynamické vlastnosti zanedbat. Výsledný operátorový přenos termočlátku je tedy:

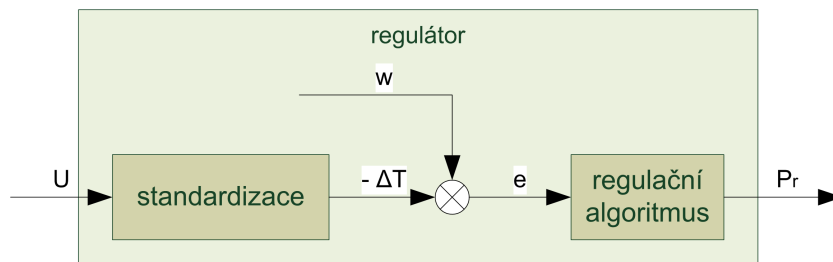
$$F_3(p) = k_3 = 38,61 \cdot 10^{-6} \quad (3.1)$$

3.3 Model regulátoru

Systém regulátoru je možné rozdělit na další subsystémy:

- **Standardizace** – převádí vstupní elektrické napětí U na rozdíl teplot mezi měřicím a srovnávacím spojem termočlátku ΔT .
- **Regulační algoritmus** – jeho vstupní veličinou je regulační odchylka e , na jejímž základě regulační algoritmus určí velikost požadovaného výstupního výkonu P_r .

Jejich zapojení je znázorněno na obrázku 3.2, kde w je žádaná hodnota veličiny ΔT a e je regulační odchylka. Dle [3] je regulační algoritmus typu PI - regulátor, takže je zřejmé, že oba dva subsystémy budou lineární. Můžeme tedy rovnou hledat jejich operátorové přenosy.



Obr. 3.2: Schematické znázornění vnitřního uspořádání regulátoru

3.3.1 Operátorový přenos standardizace

Vzhledem k tomu, že standardizační systém převádí vstupní veličinu U na ΔT a termočlánek převádí ΔT na U , je zřejmé, že jejich přenosové funkce budou navzájem inverzní:

$$F_4(p) = F_3(p)^{-1} = \frac{1}{k_3} = 2,59 \cdot 10^4 \quad (3.2)$$

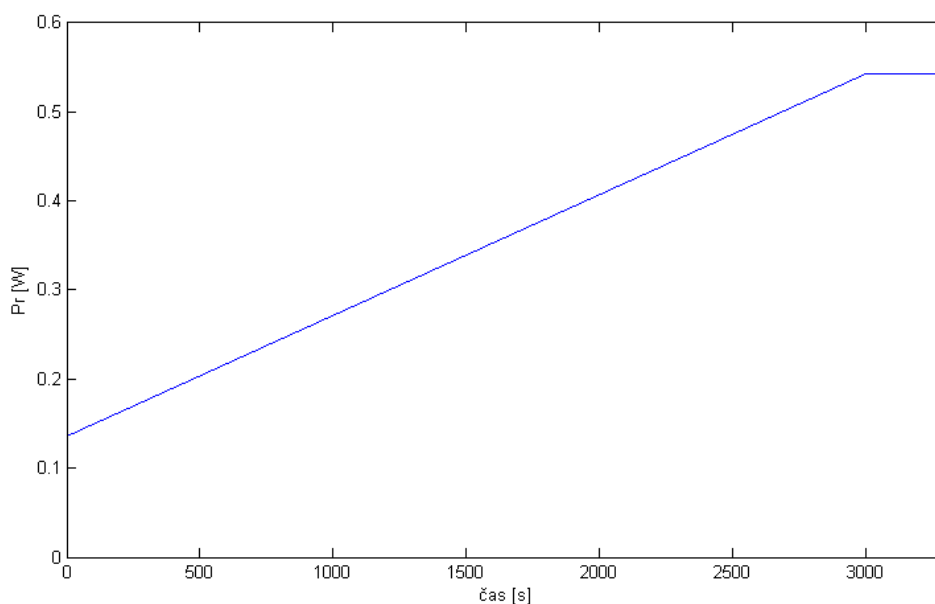
3.3.2 Operátorový přenos regulačního algoritmu

Protože součástí [3] jsou veškeré zdrojové kódy firmware zařízení EMS62, pro vytvoření modelu stávajícího regulátoru použijeme S-funkci pro MATLAB Simulink

napsanou v jazyce C. Do této S-funkce zkopírujeme a mírně upravíme zdrojový kód firmwaru, který se týká měření a regulace. Po kompilaci máme k dispozici model regulátoru pro MATLAB Simulink.

Operátorový přenos regulačního algoritmu určíme z odezvy na jednotkový skok, kterou zjistíme simulací v programu MATLAB Simulink. Přechodová charakteristika je na obrázku 3.3. Identifikovaný operátorový přenos je:

$$F_R(p) = 1,36 \cdot 10^{-1} + \frac{1,36 \cdot 10^{-4}}{p} \quad (3.3)$$



Obr. 3.3: Přechodová charakteristika regulačního algoritmu

3.4 Model topného tělesa

Topné těleso je tvořeno odporovými vodiči, které mají zanedbatelné dynamické vlastnosti. Navíc je výstupní výkon topného tělesa shodný s dodaným elektrickým výkonem, který je roven:

$$P = U_t \cdot I = \frac{U_t^2}{R_t} \quad (3.4)$$

Jedná se tedy o nelineární statický systém, který je popsán přenosovou funkcí:

$$P(t) = \frac{1}{R_t} \cdot U_t(t)^2 \quad (3.5)$$

3.5 Model linearizační funkce

Linearizační funkce slouží ke kompenzaci nelinearity topného tělesa. Je realizována v programu v mikroprocesoru pomocí linearizační tabulky, která definuje po částech lineární funkci. Protože součástí [3] jsou i zdrojové kódy, můžeme z nich sestavit předpis linearizační funkce:

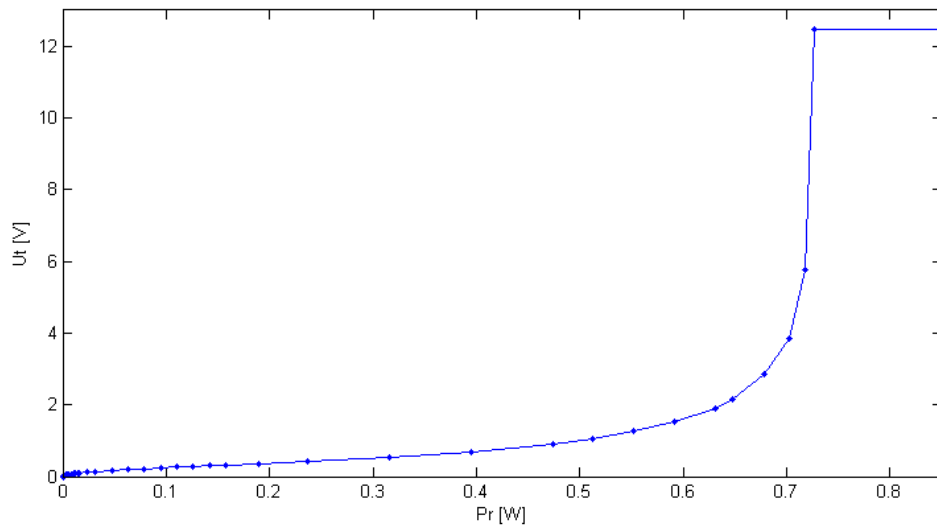
$$f_{li}(P) = \begin{cases} \frac{12,5}{46078} \cdot (a_{li} \cdot P + b_{li}) & P \in \langle 0; 0, 7273 \rangle \\ 12,5 & P \in (0, 7273; \infty) \end{cases} \quad (3.6)$$

kde parametry a_{li} a b_{li} jsou uvedeny v tabulce 3.1.

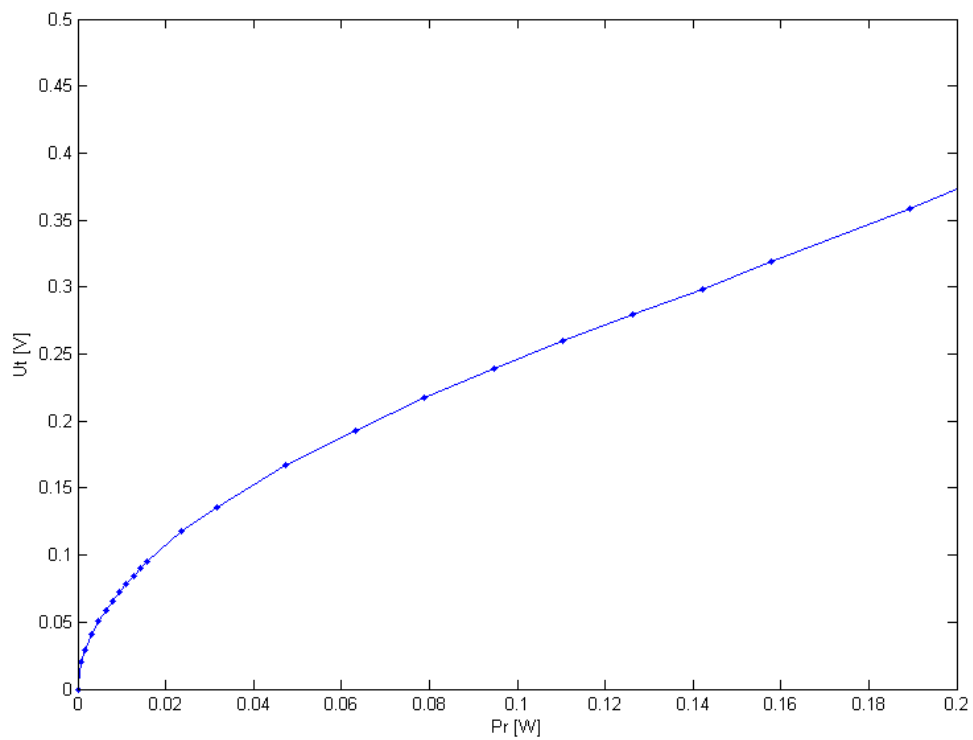
Tab. 3.1: Linearizační tabulka

	a_{li}	b_{li}		a_{li}	b_{li}
$P \in \langle 0; 0, 0008 \rangle$	0	0	$P \in (0, 1105; 0, 1262 \rangle$	1,632	0,427
$P \in (0, 0008; 0, 0016 \rangle$	21,482	0,025	$P \in (0, 1262; 0, 1420 \rangle$	1,568	0,448
$P \in (0, 0016; 0, 0032 \rangle$	13,749	0,043	$P \in (0, 1420; 0, 1578 \rangle$	1,460	0,488
$P \in (0, 0032; 0, 0047 \rangle$	9,452	0,063	$P \in (0, 1578; 0, 1894 \rangle$	1,611	0,425
$P \in (0, 0047; 0, 0063 \rangle$	7,733	0,079	$P \in (0, 1894; 0, 2368 \rangle$	1,589	0,435
$P \in (0, 0063; 0, 0079 \rangle$	6,444	0,097	$P \in (0, 2368; 0, 3157 \rangle$	1,661	0,395
$P \in (0, 0079; 0, 0095 \rangle$	5,585	0,113	$P \in (0, 3157; 0, 3946 \rangle$	1,890	0,235
$P \in (0, 0095; 0, 0110 \rangle$	5,370	0,118	$P \in (0, 3946; 0, 4735 \rangle$	2,449	-0,285
$P \in (0, 0110; 0, 0126 \rangle$	4,726	0,136	$P \in (0, 4735; 0, 5130 \rangle$	3,437	-1,435
$P \in (0, 0126; 0, 0142 \rangle$	4,511	0,143	$P \in (0, 5130; 0, 5525 \rangle$	4,554	-2,995
$P \in (0, 0142; 0, 0158 \rangle$	4,511	0,143	$P \in (0, 5525; 0, 5919 \rangle$	6,230	-5,531
$P \in (0, 0158; 0, 0237 \rangle$	4,081	0,161	$P \in (0, 5919; 0, 6314 \rangle$	8,421	-9,100
$P \in (0, 0237; 0, 0315 \rangle$	3,567	0,185	$P \in (0, 6314; 0, 6471 \rangle$	12,460	-16,15
$P \in (0, 0315; 0, 0473 \rangle$	2,792	0,239	$P \in (0, 6471; 0, 6787 \rangle$	18,690	-27,75
$P \in (0, 0473; 0, 0631 \rangle$	2,492	0,267	$P \in (0, 6787; 0, 7024 \rangle$	28,303	-46,10
$P \in (0, 0631; 0, 0789 \rangle$	2,062	0,327	$P \in (0, 7024; 0, 7182 \rangle$	52,919	-95,37
$P \in (0, 0789; 0, 0947 \rangle$	1,933	0,351	$P \in (0, 7024; 0, 7182 \rangle$	149,31	-295,0
$P \in (0, 0947; 0, 1105 \rangle$	1,761	0,391	$P \in (0, 7182; 0, 7273 \rangle$	924,66	-1937

Průběh linearizační funkce je zobrazen i graficky na obrázku 3.4. V blízkosti bodu $[0; 0]$ je průběh linearizační funkce pro větší názornost zvětšen v detailu na obrázku 3.5.



Obr. 3.4: Průběh linearizační funkce



Obr. 3.5: Průběh linearizační funkce - detail

3.6 Model zařízení EMS62

Celkový model zařízení EMS62 v našem pojetí (tj. celkový model zahrnující části zařízení EMS62, které se podílí na regulaci ΔT) není možné popsat operátorovým přenosem, neboť obsahuje nelinearity. Podle rozdělení dle obrázku 3.1 by sice měla být nelinearita topného tělesa vykompenzována linearizační funkcí a zařízení EMS62 by tak mělo být navenek lineární, ale jak se přesvědčíme v následujících kapitolách, není tomu tak.

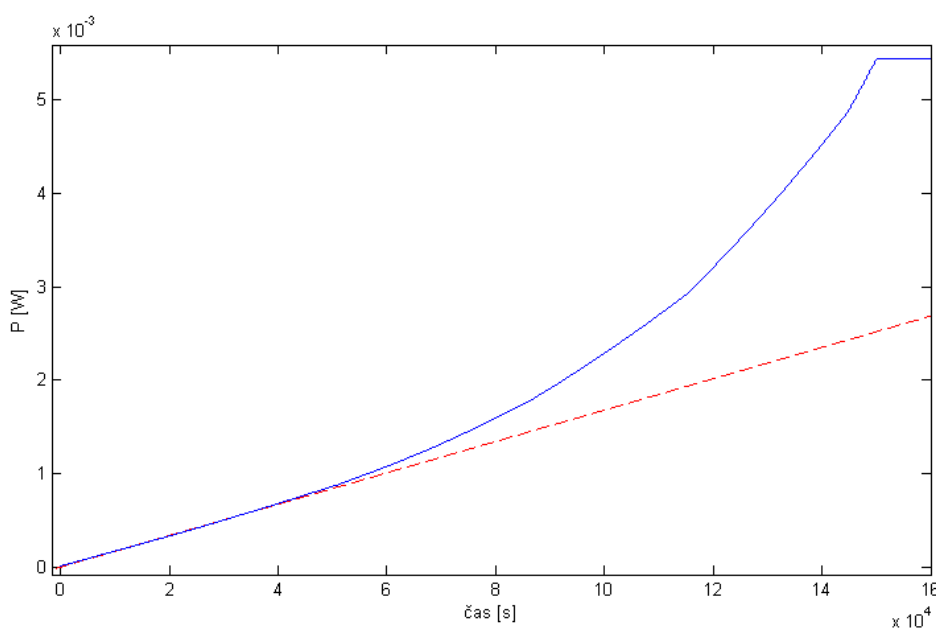
Model zařízení EMS62 je tedy vytvořen v S-funkci programu MATLAB Simulink, která obsahuje veškeré softwarové části firmware, které se podílí na regulaci ΔT . Protože je firmware napsáno v jazyce C stejně jako S-funkce MATLAB Simulinku, bylo možné většinu kódu zkopírovat pouze s mírnými úpravami, což nám přináší velmi přesný model zařízení EMS62.

4 ANALÝZA A OPRAVA PROBLÉMŮ STÁVAJÍCÍHO ZAŘÍZENÍ

Jak již bylo nastíněno v úvodu, dle informací výrobce za předem neznámých podmínek průběh naměřeného průtoku neodpovídá skutečnému transpiračnímu proudu. Cílem této kapitoly je nalézt a odstranit příčinu tohoto problému.

4.1 Detekce problémů

Průběh linearizační funkce na obrázcích 3.4 a 3.5 na první pohled neodpovídá naší představě. Jak bylo zmíněno v kapitole 3.4, přenosová funkce popisující topné těleso je kvadratická, takže pro kompenzaci její nelinearity bychom očekávali funkci odmocninnou. Ověříme tedy správnou implementaci linearizační funkce tak, že nasimulujeme na vytvořených simulačních modelech skok žádané hodnoty při odpojené zpětné vazbě. Protože průběh linearizační funkce pro velmi malé výkony odpovídá průběhu odmocninné funkce (viz.3.5), volíme skok z hodnoty 0 na hodnotu 0,01, abychom mohli pozorovat linearizaci velmi malých výkonů. Výsledná odezva je na obrázku 4.1 modrou barvou.



Obr. 4.1: Odezva zařízení EMS62 na skok žádané hodnoty

Aby linearizační funkce plnila svůj účel, tj. kompenzovala nelinearitu topného tělesa, měla by odezva zařízení EMS62 odpovídat odezvě regulačního algoritmu na

obrázku 3.3 nebo alespoň odezvě jiného lineárního systému. Jak je naznačeno na obrázku 4.1 červenou barvou, odezva nejprve vykazuje lineární průběh, který však postupně přechází v průběh kvadratický. Aby tedy linearizační funkce plnila svůj účel, musíme provést její **opravu**.

Z obrázku 4.1 je rovněž zřejmé, že není správně realizován **anti wind-up**, protože výstupní výkon P saturuje na hodnotě $5,42 \cdot 10^{-3} W$, ačkoliv technologické omezení výkonu topného tělesa je $1,56 W$.

4.2 Oprava anti wind-upu

V současném zařízení je realizován základní anti wind-up pomocí omezení integrační složky. Jako integrátor zde slouží proměnná typu `long integer`, do které je v každé regulační periodě přičtena hodnota regulační odchylky. Tato proměnná je následně kontrolována, zda její hodnota spadá do intervalu $\in \langle 0; 30000 \rangle$. Protože je rozsah tohoto intervalu velmi malý, dochází k předčasnému omezení integrační složky. Pokud bychom zvýšili horní hranici intervalu, mohlo by zase docházet k překročení maximálního výkonu topného tělesa.

Řešením je tedy návrh nového anti wind-upu se sledováním výstupu a zpětným výpočtem integrační složky. Hodnota pro zápis do D/A převodníku S (která je úměrná požadovanému výkonu P_r) je dána vztahem:

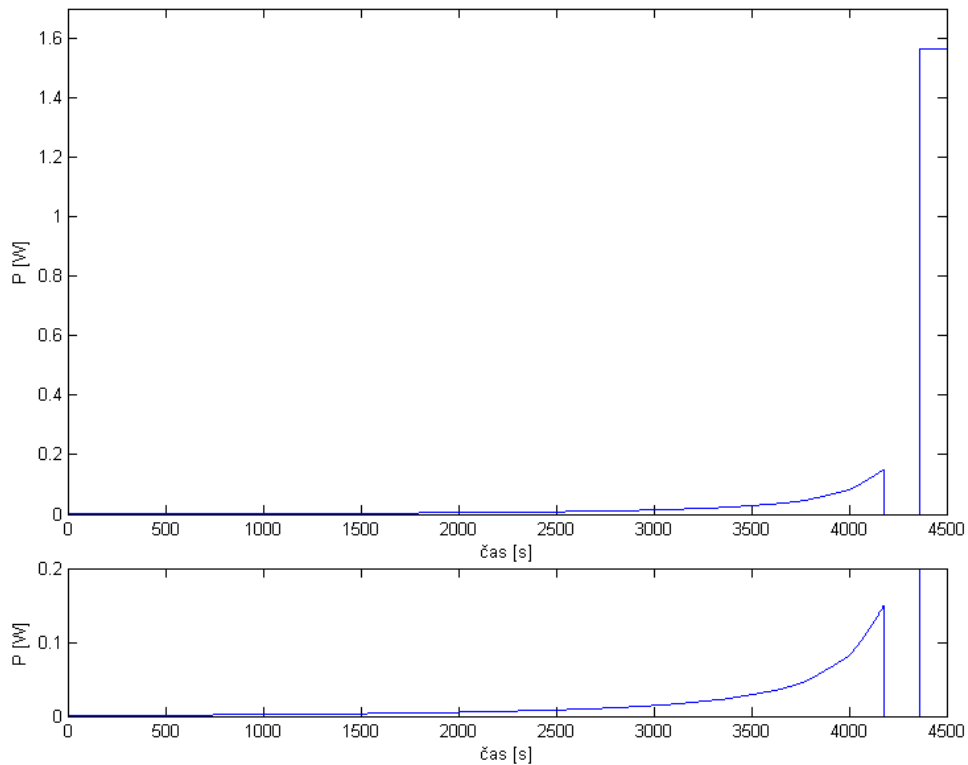
$$S = K_I \cdot i + K_P \cdot e \quad (4.1)$$

kde K_I je zesílení integrační složky PI regulátoru v regulačním algoritmu, K_P je zesílení proporcionální složky PI regulátoru v regulačním algoritmu, i je hodnota integrátoru a e je regulační odchylka. Z této rovnice můžeme zpětně vyjádřit hodnotu integrátoru pro případ nasycení:

$$i = \frac{S_{max} - K_P \cdot e}{K_I} \quad (4.2)$$

kde S_{max} je hodnota pro zápis do D/A převodníku odpovídající maximálnímu výkonu.

Po implementaci této úpravy do zdrojového kódu modelu regulačního algoritmu již výstupní výkon P saturuje na maximálním výkonu topného tělesa, jak je vidět na obrázku 4.2. Na tomto obrázku je také vidět další problém, který byl odhalen opravou anti wind-upu. Pokles výstupu v čase 4 179 s na hodnotu 0 W a následný skok na maximální výkon čase 4 363 s naznačuje **přetečení proměnné**.



Obr. 4.2: Odezva zařízení EMS62 na skok žádané hodnoty po opravě anti wind-upu včetně detailu

4.3 Oprava přetékání proměnné

Podrobně jsem analyzoval zdrojový kód linearizační funkce, kde jsem pro každou proměnnou regulačního algoritmu zjišťoval maximální a minimální možnou hodnotu, kterou do proměnné program zapisuje. Problém byl odhalen v tomto úseku kódu:

```
const signed long flash_PWM_slope[LIN_TABLE_LENGTH] = {
21482, 13749, 9452, 7733, 6444, 5585, 5370, 4726, 4511, 4511,
4081, 3566, 2792, 2492, 2062, 1933, 1761, 1632, 1568, 1460,
1611, 1589, 1661, 1890, 2449, 3437, 4554, 6230, 8421, 12460,
18690, 28303, 52919, 149306 };
```

```
si32_offset = flash_PWM_slope[i]*(int32)ui16_power;
si32_offset = si32_offset/10000 + flash_PWM_offset[i];
```

kde dochází k násobení hodnoty v `ui16_power` konstantou o velikosti až 149 306. Aby se toto číslo vešlo do proměnné typu `signed int`, jejíž maximální hodnota je

2 147 483 647, musí být v `ui16_power` nejvýše číslo 14 383. V této proměnné však může být uložena hodnota v rozsahu 0 – 46 078, takže může dojít k přetečení.

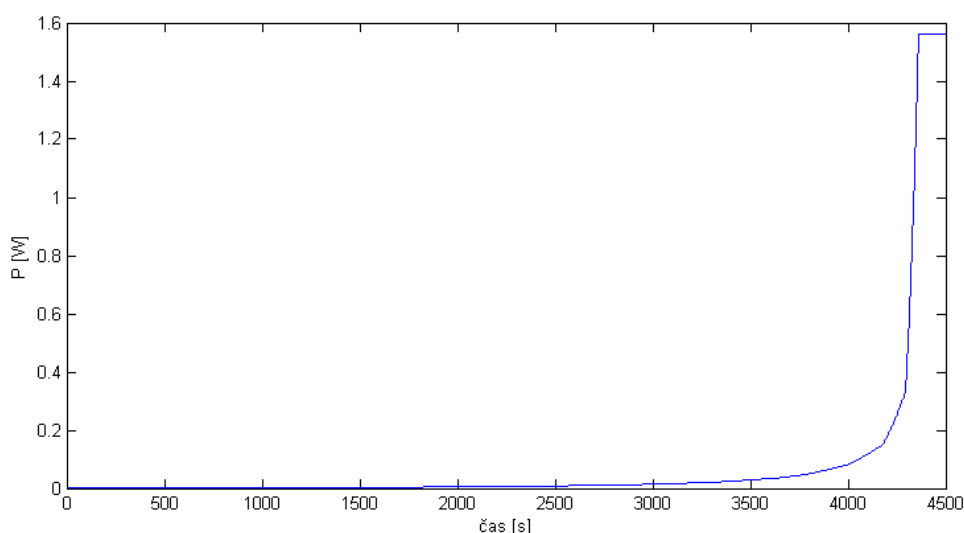
Protože použitý mikroprocesor AVR ATmega32 neumí pracovat s vyjádřením čísel v pohyblivé řádové čárce (pracuje pouze s celočíselnými hodnotami), je hodnota požadovaného výkonu P_r měřítkována tak, že: $ui16_power \sim 10000 \cdot P_r$.

Kvantovací krok P_r je tak 10^{-4} , což je zbytečné. Pro naše účely naprosto postačí kvantovací krok 10^{-3} , takže upravíme měřítkování P_r na: $ui16_power \sim 1000 \cdot P_r$, což se projeví ve zdrojovém kódu takto:

```
const signed long flash_PWM_slope[LIN_TABLE_LENGTH] = {
2148, 1375, 945, 773, 644, 559, 537, 473, 451, 451,
408, 357, 279, 249, 206, 193, 176, 163, 157, 146,
161, 159, 166, 189, 245, 344, 456, 623, 842, 1246,
1869, 2830, 5292, 14931 };
```

```
si32_offset = flash_PWM_slope[i]*(int32)ui16_power;
si32_offset = si32_offset/1000 + flash_PWM_offset[i];
```

Zde již nedochází k přetečení, neboť maximální hodnota `ui16_power` je 46 078, maximální koeficient násobení je 14 931, takže nejvyšší možné číslo zapisované do `si32_offset` je 687 990 618, což se již do rozsahu proměnné typu `signed int`¹ bez problémů vleze. Výsledná odezva zařízení EMS62 po opravě přetečení je znázorněna na obrázku 4.3.



Obr. 4.3: Odezva zařízení EMS62 na skok žádané hodnoty po opravě přetečení

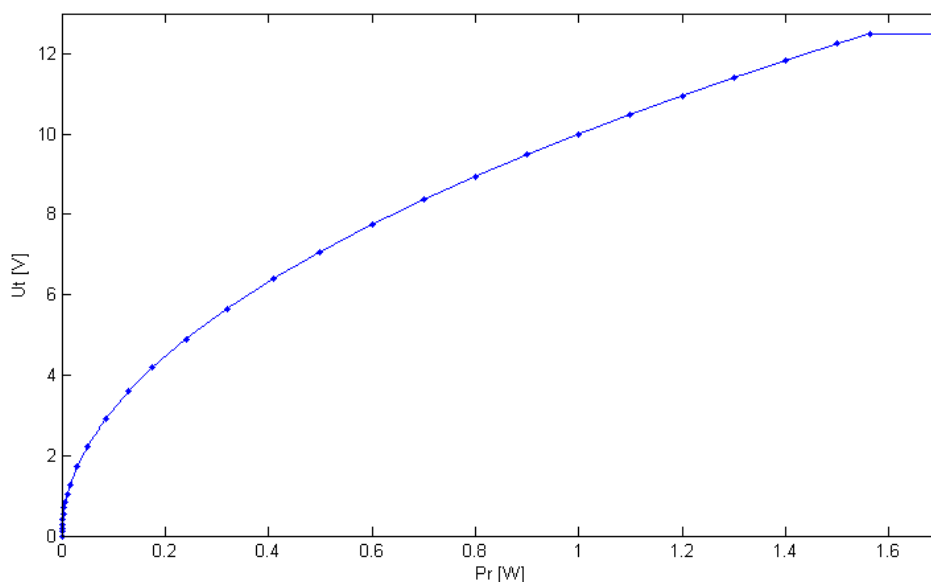
¹rozsah proměnné typu `signed int` je -2 147 483 647 až 2 147 483 647

4.4 Oprava linearizační funkce

Linearizační funkce slouží ke kompenzaci nelinearity topného tělesa, takže by měla být inverzní funkcí k funkci 3.5. Platí tedy:

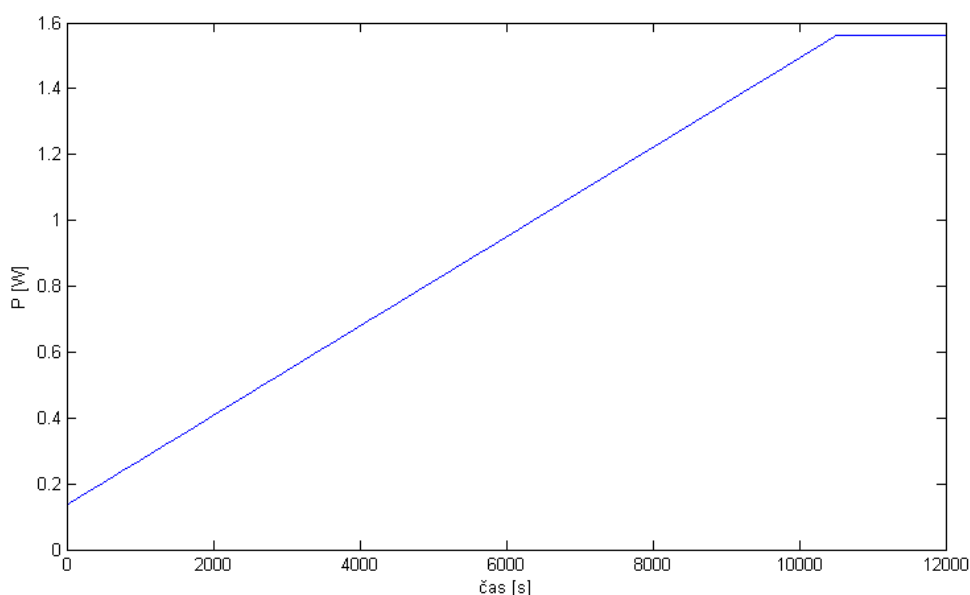
$$U_t(t) = \begin{cases} \sqrt{R_t \cdot P(t)} & P \in \langle 0; 1,5625 \rangle \\ 12,5 & P \in (1,5625; \infty) \end{cases} \quad (4.3)$$

Protože použitý mikroprocesor neumožňuje operaci odmocniny, je funkce po částech linearizována a následně realizována pomocí linearizační tabulky. Průběh linearizované funkce 4.3 je vyznačen na obrázku 4.4 modrou barvou. Místa lomu jsou zvýrazněna modrými body.



Obr. 4.4: Průběh nové linearizační funkce s vyznačenými linearizačními body

Protože je stávající linearizační funkce realizována stejným způsobem, stačí pouze vyměnit položky linearizační tabulky bez nutnosti provést další zásahy do zdrojového kódu. Odezva takto upraveného zařízení EMS62 je na obrázku 4.5. Průběh odezvy zařízení EMS62 nyní odpovídá průběhu PI-regulátoru o parametrech shodných s regulačním algoritmem. Linearizační funkce tak již plní svoji úlohu.



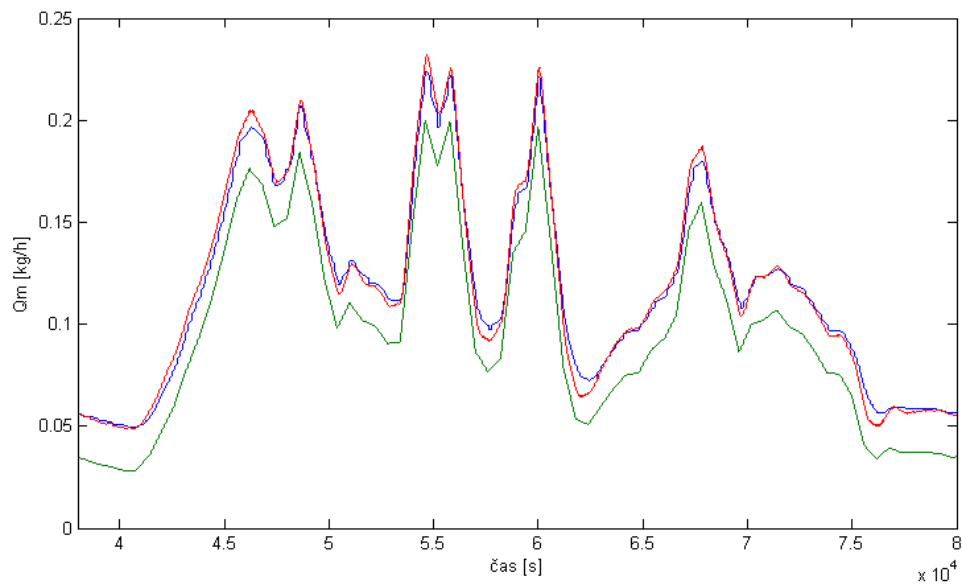
Obr. 4.5: Odezva zařízení EMS62 na skok žádané hodnoty po opravě linearizační funkce

4.5 Srovnání stávajícího a opraveného zařízení EMS62

Srovnání provedeme simulací průběhu transpiračního proudu Q_m , který je pro stromy typický [2] a budeme sledovat průběh naměřené hodnoty. Výsledek srovnávací simulace je na obrázku 4.6. Průběh naměřené hodnoty transpiračního proudu pro stávající zařízení EMS62 je vyznačen modře a pro opravené zařízení EMS62 červeně. Simulovaný průběh Q_m je vyznačen zeleně.

Z průběhů je patrné, že ačkoliv stávající zařízení EMS62 obsahuje některé chyby, výsledky měření odpovídají průběhu simulovaného transpiračního proudu. Stávající anti wind-up totiž omezuje výstupní výkon natolik, že nemůže nastat přetečení a navíc se zařízení pohybuje po části linearizační funkce, která svoji úlohu linearizace plní. Jediným problémem tedy je, že má regulátor příliš omezen výstupní výkon a není tak schopen dosáhnout požadovaného $\Delta T = 2 K$. Protože je však transpirační proud Q_m počítán nikoliv z žádané hodnoty ΔT , ale ze skutečné hodnoty ΔT , výsledek měření odpovídá průběhu reálného transpiračního proudu.

Přesnost měření zařízení EMS62 závisí mimo jiné také na přesnosti měření ΔT , které je při menších hodnotách zatíženo výrazně větší chybou, například díky výskytu kvantizačního šumu nebo rušivých napětí na vedení z termočlánku. Stávající zařízení EMS62 tak tedy svoji měřicí úlohu plní, ale protože veličina ΔT v průběhu měření kolísá, kolísá i přesnost měření. To je vidět i na výsledcích srovnání na obrázku 4.6.



Obr. 4.6: Srovnání výsledků měření stávajícího (modře) a opraveného (červeně) zařízení EMS62 se simulovaným průběhem Q_m (zeleně).

Při hodnotách Q_m , které jsou v oblasti maxima ($0, 2 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$) je díky omezení výkonu hodnota ΔT velmi malá, a proto průběh naměřených hodnot odpovídá simulovanému průběhu méně, než při nižších hodnotách Q_m . Navíc nesmíme zapomenout, že model uvažuje pouze výskyt kvantizačního šumu a jiné vlivy působící na přesnost měření jsou zanedbány. Ve skutečnosti bude tedy přesnost měření horší.

Pro zařízení EMS62 je tedy důležité minimalizovat součet odchylek regulované veličiny od žádané hodnoty po celou dobu měření, což bylo výsledkem oprav. Opravené zařízení tedy měří s vyšší přesností než zařízení stávající.

5 STABILITA REGULAČNÍHO OBVODU

Cílem této kapitoly je analyzovat možné příčiny nestability regulačního obvodu a určit podmínky pro stabilní chování v celém rozsahu parametrů regulované soustavy.

Regulační obvod je tvořen regulovanou soustavou s operátorovým přenosem $F(p)$ (rovnice 2.53) a zařízením EMS62¹ s operátorovým přenosem:

$$F_R(p) = K_R \left(1 + \frac{1}{T_i p} \right) = \frac{K_R T_i p + K_R}{T_i p} \quad (5.1)$$

Přenos otevřené smyčky je pak roven:

$$F_o(p) = \frac{K_{F2} K_R T_i p + K_{F2} K_R}{T_i p (T_{F1} p + 1) (T_{F2} p + 1)} \quad (5.2)$$

Z něj pak plyne charakteristická rovnice:

$$T_{F1} T_{F2} T_i p^3 + T_i (T_{F1} + T_{F2}) p^2 + T_i (K_{F2} K_R + 1) p + K_{F2} K_R = 0 \quad (5.3)$$

5.1 Určení stability pomocí Charitonových polynomů

Regulační obvod je charakterizován intervalovým polynomem vycházejícím z charakteristické rovnice 5.3:

$$I(p, q) = \sum_{i=0}^3 [q_i^-, q_i^+] p^i \quad (5.4)$$

kde q_i^- je spodní hranice intervalu koeficientu a q_i^+ je horní hranice intervalu koeficientu. Z něj plynou následující Charitonovy polynomy:

$$K_1(p) = q_0^- + q_1^- p + q_2^+ p^2 + q_3^+ p^3 \quad (5.5)$$

$$K_2(p) = q_0^+ + q_1^+ p + q_2^- p^2 + q_3^- p^3 \quad (5.6)$$

$$K_3(p) = q_0^+ + q_1^- p + q_2^- p^2 + q_3^+ p^3 \quad (5.7)$$

$$K_4(p) = q_0^- + q_1^+ p + q_2^+ p^2 + q_3^- p^3 \quad (5.8)$$

Pro jednotlivé koeficienty v našem případě platí:

$$q_0 = K_{F2} K_R \quad q_0^- = 2,95 K_R \quad q_0^+ = 48 K_R \quad (5.9)$$

$$q_1 = T_i (K_{F2} K_R + 1) \quad q_1^- = T_i (2,95 K_R + 1) \quad q_1^+ = T_i (48 K_R + 1) \quad (5.10)$$

$$q_2 = T_i (T_{F1} + T_{F2}) \quad q_2^- = 43,22 T_i \quad q_2^+ = 2880 T_i \quad (5.11)$$

$$q_3 = T_{F1} T_{F2} T_i \quad q_3^- = 128,8 T_i \quad q_3^+ = 728000 T_i \quad (5.12)$$

¹Pod pojmem "zařízení EMS62" rozumíme lineární systém, jehož definice je uvedena v kapitole 3.1

Regulační obvod je robustně stabilní tehdy a jen tehdy, když jsou stabilní všechny čtyři Charitonovy polynomy [8]. Stabilitu jednotlivých polynomů určíme pomocí Hurwitzova kriteria. Hurwitzovy determinanty jednotlivých polynomů jsou:

$$D_1 = \begin{vmatrix} 2880T_i & 728000T_i \\ 2,95K_R & T_i(2,95K_R + 1) \end{vmatrix} \quad (5.13)$$

$$D_2 = \begin{vmatrix} 43,22T_i & 128,8T_i \\ 48K_R & T_i(48K_R + 1) \end{vmatrix} \quad (5.14)$$

$$D_3 = \begin{vmatrix} 43,22T_i & 728000T_i \\ 48K_R & T_i(2,95K_R + 1) \end{vmatrix} \quad (5.15)$$

$$D_4 = \begin{vmatrix} 2880T_i & 128,8T_i \\ 2,95K_R & T_i(48K_R + 1) \end{vmatrix} \quad (5.16)$$

První subdeterminanty jsou vždy kladné, protože všechny koeficienty všech intervalových polynomů jsou vždy kladné. Aby byly druhé subdeterminanty také kladné, musí být současně splněny všechny tyto podmínky:

$$2880T_i(2,95K_R + 1) - 2147600K_R > 0 \quad (5.17)$$

$$43,22T_i(48K_R + 1) - 6182K_R > 0 \quad (5.18)$$

$$43,22T_i(2,95K_R + 1) - 34944000K_R > 0 \quad (5.19)$$

$$2880T_i(48K_R + 1) - 379,96K_R > 0 \quad (5.20)$$

Po úpravě získáme soustavu podmínek pro T_i :

$$T_i > \frac{2147600K_R}{2880(2,95K_R + 1)} \quad (5.21)$$

$$T_i > \frac{6182K_R}{43,22(48K_R + 1)} \quad (5.22)$$

$$T_i > \frac{34944000K_R}{43,22(2,95K_R + 1)} \quad (5.23)$$

$$T_i > \frac{379,96K_R}{2880(48K_R + 1)} \quad (5.24)$$

Z nich je nejpřísnější podmínka 5.23, protože její čítecitel je největší z čítecitelů zlomků z rovnic 5.21 - 5.24 a současně je její jmenovatel nejmenší. Úpravou této rovnice získáme podmínku robustní stability regulačního obvodu:

$$T_i > \frac{2,74 \cdot 10^5 K_R}{K_R + 3,39 \cdot 10^{-1}} \quad (5.25)$$

5.2 Určení stability pomocí Hurwitzova kritéria

Nutnou podmínkou pro výpočet stability pomocí Hurwitzova kritéria je, aby všechny koeficienty charakteristické rovnice byly reálné, nenulové a ležely ve stejné poloovině. Tato podmínka je splněna, protože všechny parametry T_i , T_{F1} a T_{F2} jsou vždy kladné.

Z charakteristické rovnice 5.3 sestavíme Hurwitzův determinant [5]:

$$D = \begin{vmatrix} T_i(T_{F1} + T_{F2}) & T_{F1}T_{F2}T_i \\ K_{F2}K_R & T_i(K_{F2}K_R + 1) \end{vmatrix} \quad (5.26)$$

Systém bude stabilní, když všechny subdeterminanty sestavené nad hlavní diagonálou budou kladné, tedy když:

$$|T_i(T_{F1} + T_{F2})| > 0 \quad (5.27)$$

$$\begin{vmatrix} T_i(T_{F1} + T_{F2}) & T_{F1}T_{F2}T_i \\ K_{F2}K_R & T_i(K_{F2}K_R + 1) \end{vmatrix} > 0 \quad (5.28)$$

Podmínka 5.27 je splněna vždy, protože parametry T_i , T_{F1} a T_{F2} jsou vždy kladné. Aby byla splněna i podmínka 5.28 musí platit:

$$T_i^2(T_{F1} + T_{F2})(K_{F2}K_R + 1) - K_{F2}K_RT_{F1}T_{F2}T_i > 0 \quad (5.29)$$

Vyjádríme-li z předchozí rovnice T_i , získáváme:

$$T_i > \frac{K_{F2}K_RT_{F1}T_{F2}}{(K_{F2}K_R + 1)(T_{F1} + T_{F2})} = \frac{\frac{T_{F1}T_{F2}}{T_{F1}+T_{F2}}K_R}{K_R + \frac{1}{K_{F2}}} \quad (5.30)$$

Aby byla stabilita zaručena na celém rozsahu parametrů, musí platit:

$$T_i > \max \frac{\frac{T_{F1}T_{F2}}{T_{F1}+T_{F2}}K_R}{K_R + \frac{1}{K_{F2}}} = \frac{\max\left(\frac{T_{F1}T_{F2}}{T_{F1}+T_{F2}}\right)K_R}{K_R + \min\frac{1}{K_{F2}}} \quad (5.31)$$

Abychom mohli určit průběh funkce $f(T_{F1}, T_{F2}) = \frac{T_{F1}T_{F2}}{T_{F1}+T_{F2}}$, určíme její parciální derivace:

$$\frac{\partial f}{\partial T_{F1}} = \frac{T_{F2}(T_{F1} + T_{F2}) - T_{F1}T_{F2}}{(T_{F1} + T_{F2})^2} = \frac{T_{F2}^2}{(T_{F1} + T_{F2})^2} \quad (5.32)$$

$$\frac{\partial f}{\partial T_{F2}} = \frac{T_{F1}(T_{F1} + T_{F2}) - T_{F1}T_{F2}}{(T_{F1} + T_{F2})^2} = \frac{T_{F1}^2}{(T_{F1} + T_{F2})^2} \quad (5.33)$$

Obě parciální derivace na rozsahu parametrů nenabývají nulové hodnoty a navíc jsou stále kladné, takže funkce $f(T_{F1})$ nemá žádné lokální extrémy a je stále rostoucí. V tomto případě pak platí:

$$\max \left(\frac{T_{F1} T_{F2}}{T_{F1} + T_{F2}} \right) = \frac{\max T_{F1} \cdot \max T_{F2}}{\max T_{F1} + \max T_{F2}} = 252,78 \quad (5.34)$$

$$\min \frac{1}{K_{F2}} = \frac{1}{\max K_{F2}} = 0,208 \quad (5.35)$$

Po dosazení a úpravě získáme podmínku pro stabilitu regulačního obvodu:

$$T_i > \frac{2,52 \cdot 10^2 K_R}{K_R + 2,08 \cdot 10^{-1}} \quad (5.36)$$

5.3 Shrnutí

Aby byl regulační obvod stabilní pro všechny možné kombinace parametrů, je možné volit libovolné zesílení regulátoru K_R . V závislosti na zvoleném K_R pak plyne podmínka pro hodnotu integrační konstanty T_i , která je dána rovnicemi 5.25 a 5.36.

Je vidět, že podmínka stability určená pomocí Charitonových polynomů je mnohem přísnější než podmínka určená pomocí Hurwitzova kritéria. Výpočet stability pomocí Charitonových polynomů totiž předpokládá, že koeficienty charakteristické rovnice jsou na sobě nezávislé, což není v tomto případě splněno. Výpočet pomocí Hurwitzova kritéria již závislost koeficientů zohledňuje, proto je podmínka stability méně přísná.

Z výše uvedených důvodů tedy za podmínku stability regulačního obvodu považujeme rovnici 5.36.

Zesílení stávajícího regulátoru je $K_R = r_0 = 1,36 \cdot 10^{-1}$. Z rovnice 5.36 tedy plyne podmínka:

$$T_i > 99,63 \quad (5.37)$$

Protože $T_i = \frac{r_0}{r_1} = 1,00 \cdot 10^3$, je tato podmínka splněna. Stávající regulační obvod tedy bude pro všechny kombinace parametrů dané rozsahy 2.54 - 2.56 **stabilní**.

6 NÁVRH NOVÉHO REGULAČNÍHO ALGORITMU

Tato kapitola se zabývá návrhem nového regulačního algoritmu, který by předčil stávající algoritmus v kritériu minimálního součtu odchylek regulované veličiny od žádané hodnoty po celý průběh měření. Protože jsou parametry regulované soustavy časově variantní, výsledný regulátor musí být dostatečně robustní, aby změny parametrů ovlivňovaly kvalitu regulace co nejméně.

6.1 Reléový regulátor

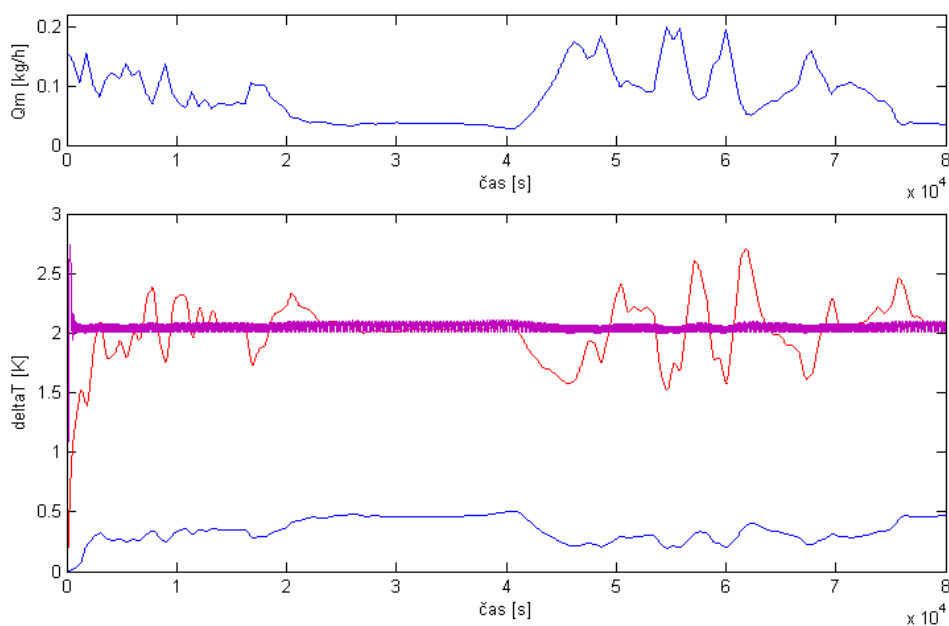
Protože se parametry regulované soustavy mění ve velmi širokém rozsahu a regulace je realizována číslicovým regulačním algoritmem, je vhodné použít reléový regulátor [5].

Jelikož není možné do soustavy dodávat záporný výkon, uijeme reléový regulátor typu „on-off“. Protože má soustava na převážné části rozsahu možných parametrů velkou setrvačnost, a také případné časté přepínání nemá výrazný vliv na opotřebení přístroje, použijeme relé bez hystereze s převodní charakteristikou:

$$P_r = f(e) = \begin{cases} 1,5625 & e \in \langle 0; \infty \rangle \\ 0 & e \in (-\infty; 0) \end{cases} \quad (6.1)$$

Srovnání regulátorů provedeme simulací průběhu transpiračního proudu Q_m , který je pro stromy typický [2] a budeme sledovat průběh regulované veličiny při žádané hodnotě $\Delta T = 2 \text{ K}$. Výsledek srovnávací simulace je na obrázku 6.1. Průběh regulované veličiny pro stávající regulátor je vyznačen modře, pro opravený regulátor červeně a pro nově navržený reléový regulátor fialově.

Je vidět, že reléový regulátor je robustnější, neboť transpirační proud ovlivňuje průběh regulované veličiny velmi nepatrně. Také předčí stávající i opravený regulátor v kritériu minima součtu odchylek regulované veličiny. Nevýhodou však je, že regulovaná veličina je více oscilující, protože reléový regulátor nemá možnost působit záporným akčním zásahem a navíc má soustava výraznou setrvačnost. Regulátor tedy musí „čekat“ na ochlazení měřiče, a poté, když začne dodávat výkon, chvíli trvá než začne soustava reagovat. To vede k vzniku pozorovaných oscilací.



Obr. 6.1: Srovnání kvality regulace stávajícího (modře), opraveného (červeně) a navrženého reléového regulátoru (fialově)

6.2 Vícetavový reléový regulátor

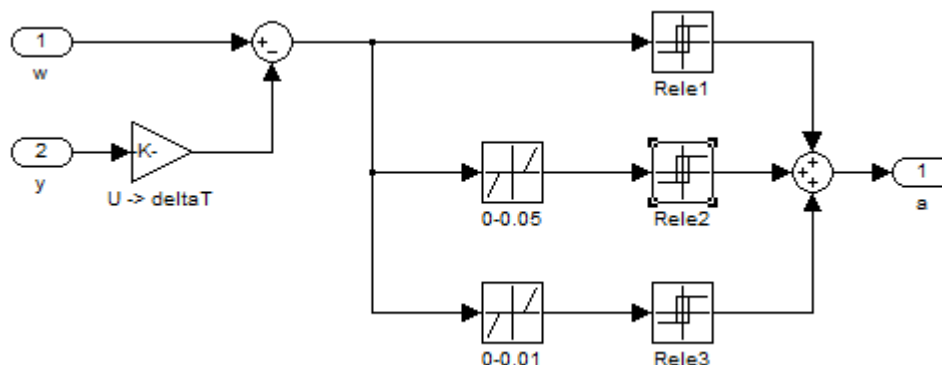
Jak bylo zmíněno v předchozí kapitole, reléový regulátor předčí stávající i opravený regulátor v několika ohledech, problémem je však oscilující průběh regulované veličiny. Příčinou je velké množství tepla, které je soustavě dodáno do okamžiku, než soustava zareaguje a odchylka od žádané hodnoty klesne pod hodnotu 0. Tento jev je možné eliminovat omezením amplitudy výkonu, což by se však projevilo zhoršením dynamických vlastností regulátoru.

Řešením je tedy implementace vícetavového reléového regulátoru, který je popsán funkcí:

$$P_r = f_2(e) = \begin{cases} 0 & e \in (-\infty; 0) \\ 0,2344 & e \in (0; 0,01) \\ 0,4688 & e \in (0,01; 0,05) \\ 1,5625 & e \in (0,05; \infty) \end{cases} \quad (6.2)$$

Pokud je odchylka velmi malá (0 - 0,01 K), je aktivní reléová regulace o amplitudě rovné 15% maximálního výkonu, která zabezpečí malý překmit regulované veličiny a tím omezí nežádoucí oscilace. V případě, že je odchylka větší (0,01 - 0,05 K), znamená to, že transpirační proud Q_m je natolik značný, že není možné za této

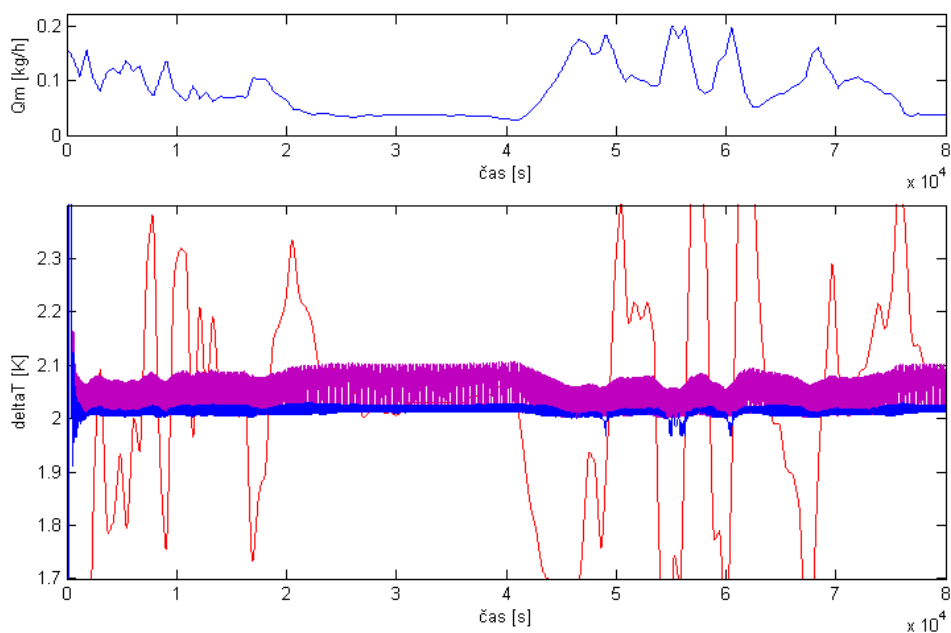
amplitudy dosáhnout žádané hodnoty. Amplituda se tedy zvedne na 30 % maximálního výkonu. Tento výkon by již měl být schopen eliminovat regulační odchylku při konstantním průtoku do $0,2 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$, což je maximální hodnota Q_m . V případě, že je odchylka větší než $0,05 \text{ K}$ předpokládáme, že došlo ke změně parametrů soustavy (změnou transpiračního proudu) a systém je regulován reléovým regulátorem o maximální výkonu. Tím dojde k rychlému vyregulování odchylky. Model vícestavového regulátoru v MATLAB Simulinku je na obrázku 6.2.



Obr. 6.2: Model vícestavového reléového regulátoru v MATLAB Simulinku

Srovnání regulátorů provedeme opět simulací typického průběhu transpiračního proudu Q_m a budeme sledovat průběh regulované veličiny při žádané hodnotě $\Delta T = 2 \text{ K}$. Výsledek srovnávací simulace je na obrázku 6.3. Průběh regulované veličiny pro opravený regulátor je vyznačen červeně, pro reléový regulátor fialově a pro nově navržený vícestavový reléový regulátor modře.

Je vidět, že amplituda nežádoucích kmitů se oproti reléovému regulátoru výrazně zmenšila (10x), ale ostatní vlastnosti reléového regulátoru přitom zůstaly nezměněny.



Obr. 6.3: Srovnání kvality regulace opraveného (červeně), reléového (fialově) a vícestavového reléového regulátoru (modře)

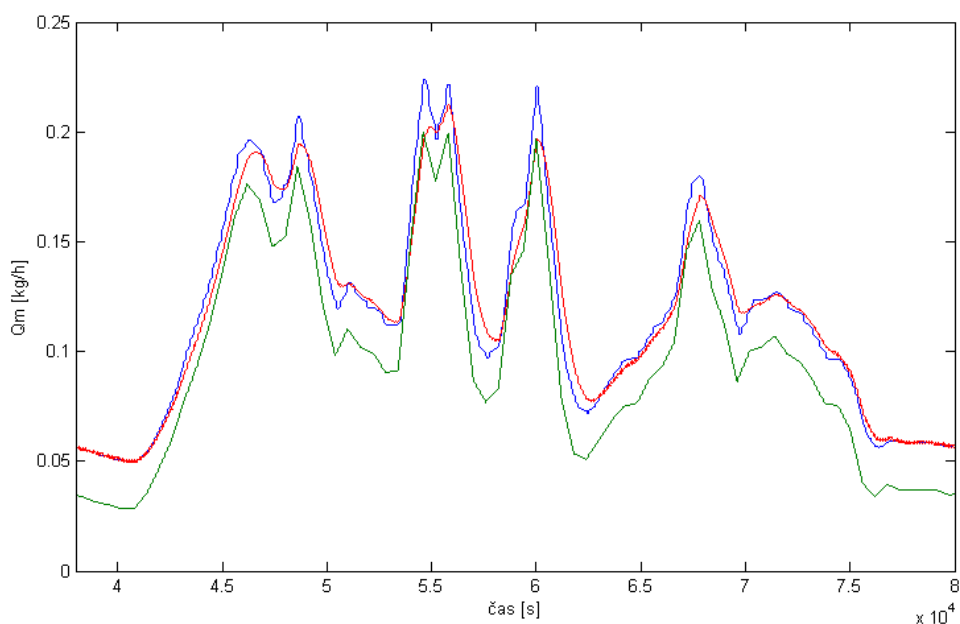
6.3 Rekonstrukce průtoku z dodávaného výkonu

Díky užití nových regulačních algoritmů neplatí, že průběh dodávaného výkonu odpovídá transpiračnímu proudu Q_m . Abychom tedy dokázali z průběhu P určit transpirační proud, musíme provést číslicovou filtraci.

6.3.1 Číslicová filtrace s pevným krokem

K rekonstrukci Q_m z průběhu P můžeme použít plovoucí průměr [6]. Výstupní hodnota po číslicové filtraci je dána aritmetickým průměrem posledních n vzorků, kde n je tzv. šířka průměrovacího okna. Čím je n vyšší, tím více vzorků je průměrováno a tím více je průběh vyhlazen.

Pro naše účely je nutné najít takový kompromis, aby nebyla výstupní hodnota příliš zvlněná, ale aby současně nedošlo k vyhlazení některých důležitých zlomů měřeného průběhu Q_m . Jako optimální se zdá $n = 5000$ při vzorkovací periodě $0,1$ s. Takovéto filtrování nám poskytuje minimálně zvlněný průběh s nejmenší možnou ztrátou detailů. Srovnání průběhu Q_m naměřeného stávajícím zařízením EMS62 (modře) a zařízením EMS62 s implementovaným vícestavovým reléovým regulátorem a číslicovou filtrací s pevným krokem (červeně) je na obrázku 6.4. Simulovaný průběh Q_m je zobrazen zeleně.



Obr. 6.4: Srovnání výsledku měření stávajícího zařízení EMS62 (modře) a zařízení EMS62 s víceetavovým reléovým regulátorem a číslicovou filtrací s pevným krokem (červeně) se simulovaným průběhem Q_m (zeleně)

Je vidět, že výsledek měření neodpovídá průběhu Q_m tak dobře jako průběh naměřený stávajícím regulátorem.

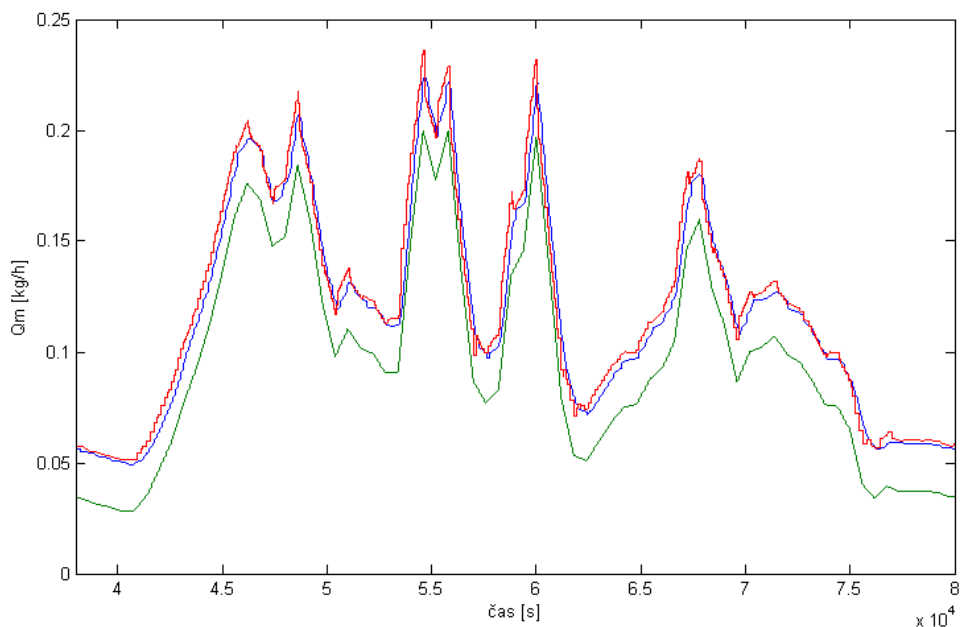
6.3.2 Číslicová filtrace s plovoucím krokem

Abychom při filtraci neztráceli důležité informace jako tomu bylo v případě plovoucího průměru, zvolíme nyní číslicovou filtraci s plovoucím krokem. Její princip je podobný zpětnému výpočtu dodaného výkonu při užití pulzně šířkové modulace (PWM). Číslicový algoritmus v průběhu výkonu detekuje nástupné a sestupné hrany obdélníkového signálu a z jejich vzdálenosti určuje dobu, po kterou je výkon dodáván do regulované soustavy. Na základě této doby a hodnoty P je možné určit dodané teplo na jeden pulz. Výstupní hodnota číslicového filtru je pak dána vztahem:

$$P(k) = \frac{Q(k-1) \cdot T(k-1) + Q(k-2) \cdot T(k-2)}{T(k-1) + T(k-2)} \quad (6.3)$$

kde $T(k)$ je doba trvání k -tého pulzu [s], $Q(k)$ je teplo na k -tý pulz [J] a $P(k)$ je výstupní hodnota filtru za průběhu k -tého pulzu [W]. Výstupní hodnota je vždy konstantní po dobu trvání pulzu a výpočet její nové hodnoty je prováděn pouze při nástupné nebo sestupné hraně.

Srovnání průběhu Q_m naměřeného stávajícím zařízením EMS62 (modře) a zařízením EMS62 s implementovaným vícestavovým reléovým regulátorem a číslicovou filtrací s plovoucím krokem (červeně) je na obrázku 6.5. Simulovaný průběh Q_m je zobrazen zeleně.



Obr. 6.5: Srovnání výsledku měření stávajícího zařízení EMS62 (modře) a zařízení EMS62 s vícestavovým reléovým regulátorem a číslicovou filtrací s plovoucím krokem (červeně) se simulovaným průběhem Q_m (zeleně)

Je vidět, že výsledek měření opět neodpovídá průběhu Q_m tak dobře jako průběh naměřený stávajícím regulátorem.

6.4 Shrnutí

Nově navržené regulační algoritmy jsou výrazně lepší v kritériu minimálního součtu odchylek regulované veličiny od žádané hodnoty po celý průběh měření. Na rozdíl od stávajícího a opraveného regulátoru nejsou tolik ovlivňovány změnou parametrů regulované soustavy způsobenou působením transpiračního proudu.

Velkou nevýhodou těchto algoritmů však je, že průběh dodávaného výkonu není spojitý a tím pádem neodpovídá průběhu transpiračního proudu, takže je nutné použít číslicovou filtraci. Užitím základních číslicových filtrů nebylo možné dosáhnout

průběhu, který by odpovídal transpiračnímu proudu tak dobře jako je tomu u opraveného zařízení EMS62. Tato nevýhoda by však v budoucnu mohla být odstraněna užitím některého z pokročilejších číslicových filtrů.

7 ZÁVĚR

Podstatnou částí této práce bylo vytvoření modelu regulované soustavy a všech částí měřicího zařízení EMS62, které se na regulaci podílí. Výsledkem je poznatek, že regulovanou soustavu lze aproximovat lineárním modelem druhého řádu s časově proměnnými parametry, jejichž možné rozsahy byly také stanoveny. Model nebylo možné důkladně ověřit praktickým měřením, protože parametry regulované soustavy jsou závislé na velikosti transpiračního proudu, kterou nemůžeme uměle ovlivnit, a dokonce ani měřit jinak než tímto zařízením. Modely částí zařízení EMS62 byly vytvořeny ve formě S-funkce pro program MATLAB Simulink, neboť mi byly poskytnuty veškeré zdrojové kódy programu v řídicím mikrokontroléru. Domnívám se tedy, že tyto modely budou velice dobře odpovídat skutečnosti.

V druhé části práce bylo pomocí analýzy vstupních a výstupních signálu z modelu regulátoru a zejména analýzou zdrojového kódu zjištěno několik chyb, kterých se konstruktér při návrhu přístroje dopustil. Jednalo se o nevhodně realizovaný anti wind-up, chybu přetečení a nesprávnou linearizační funkci. Ke všem těmto problémům byla navržena odpovídající řešení, které byla simulačně ověřena. Jejich implementací by mělo dojít ke zvýšení přesnosti přístroje.

V další části práce byla určena podmínka zaručující stabilitu regulačního obvodu pomocí dvou rozdílných metod, jejichž výsledky byly srovnány. Bylo zjištěno, že stávající regulační smyčka tuto podmínku splňuje a obvod je tak na celém rozsahu parametrů stabilní.

Poslední částí práce byl návrh nových regulačních algoritmů, které by předčily stávající regulátor ve stanoveném kritériu. Z hlediska tohoto kritéria sice došlo k výraznému zlepšení dynamických vlastností regulátoru, avšak díky následným úskalím, které způsobil odlišný princip nového algoritmu, nedošlo k významnému zlepšení přesnosti přístroje. Z tohoto důvodu byla změna regulačního algoritmu konstatována jako zbytečná.

Obsah této práce přináší komplexní analýzu chování základních částí přístroje, upozorňuje na problémy a poskytuje modely a analýzy, které budou jistě velmi užitečné při dalším vývoji přístroje.

LITERATURA

- [1] KUČERA, J. *EMS 62 SAP FLOW SYSTEM Instruction Manual* [online]. 2010, poslední aktualizace leden 2010 [cit. 22. 11. 2010]. Dostupné z URL: <<http://www.emsbrno.cz/p.axd/en/EMS.62.html>>.
- [2] ČERMÁK, J. *Měření transpiračního proudu u stromů* [online]. 2006, poslední aktualizace 2006 [cit. 22. 11. 2010]. Dostupné z URL: <http://www.uel.cz/download/Multimedialni_ucebni_text/voda_v_lesnich_ekosystemech.htm>.
- [3] KUČERA, J. *Firemní dokumentace přístroje EMS62*. 2010, poslední aktualizace leden 2010 [cit. 22. 11. 2010].
- [4] HORÁČEK, P. *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I*. MZLU Brno, 1998.
- [5] ŠOLC, F.; VÁCLAVEK, P.; VAVŘÍN, P. *Řízení a regulace II*. VUT Brno, 2010.
- [6] PIVOŇKA, P. *Číslicová řídicí technika*. VUT Brno, 2003.
- [7] KMÍNEK, M. *Matematické modelování technologických procesů a jeho využití k řízení*. Automatizace. 2007, roč. 50, č. 4, str. 266 - 270.
- [8] BLAHA, P. *Intervalové polynomy* [online]. 2009, poslední aktualizace 2.2.2009 [cit. 16. 5. 2011]. Dostupné z URL: <<http://sites.google.com/site/algebraickearobustnirizeni/prednasky-kestazeni>>.
- [9] BEJČEK, L. *Měření neelektrických veličin*. VUT Brno, 2008.
- [10] KINOVIČ, F.; KÁŇA, R.; KADLEC, K. *Tepelné hmotnostní průtokoměry a regulátory*. Automa. 2003, roč. 2003, č. 12. Dostupné z URL: <http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=29006>.
- [11] KINCL, L.; KINCL, M.; JAKRLOVÁ, J. *Biologie rostlin pro 1. ročník gymnázií*. 4. přepracované vydání, Fortuna, Praha, 2006.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

c měrná tepelná kapacita dřevní části větve [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]

c_k měrná tepelná kapacita kůry [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]

d průměr dřevní hmoty větve [m]

ΔT rozdíl teplot mezi měřicím a srovnávacím spojem termočlánku [K]

ΔT_k rozdíl teplot mezi povrchem kůry a rozhraním kůry a dřevní části větve [K]

$F(p)$ operátorový přenos regulované soustavy

$F_1(p)$ operátorový přenos kůry

$F_2(p)$ operátorový přenos dřevní části větve

$F_3(p)$ operátorový přenos termočlánku

$F_4(p)$ operátorový přenos standardizace

$F_o(p)$ operátorový přenos otevřené smyčky

$F_R(p)$ operátorový přenos regulačního algoritmu

K_{F2} zesílení operátorového přenosu dřevní části [-]

K_R zesílení regulačního algoritmu [-]

k_3 zesílení termočlánku [$\mu V \cdot K^{-1}$]

K_I zesílení integrační složky PI regulátoru v regulačním algoritmu [-]

K_P zesílení proporcionální složky PI regulátoru v regulačním algoritmu [-]

k_z koeficient tepelných ztrát v měřišti [-]

l délka ohřívané části větve (délka měřišťe) [m]

λ_k tepelná vodivost kůry [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]

m hmotnost dřevní části měřišťe (včetně vody) [kg]

m_k hmotnost kůry [kg]

P výkon dodávaný tepelným článkem do měřišťe [W]

Q_{in} teplo vstupující do soustavy [J]

Q_d teplo dodané topným tělesem [J]
 Q_m hmotnostní průtok tekutin větví (transpirační proud) [$kg \cdot s^{-1}$]
 Q_{out} teplo vystupující ze soustavy [J]
 Q_{ak} teplo akumulované v soustavě [J]
 Q_z ztráta tepla vedením [J]
 R_t odpor topného tělesa [Ω]
 ρ hustota dřeva [$kg \cdot m^{-3}$]
 S_k povrch kůry na který působí P [m^2]
 S_{max} hodnota pro zápis do D/A převodníku odpovídající maximálnímu napětí
 T_{F1} časová konstanta operátorového přenosu kůry [s]
 T_{F2} časová konstanta operátorového přenosu dřevní části [s]
 T_i integrační konstanta regulačního algoritmu [$-$]
 x_k tloušťka kůry [m]
 z tepelné ztráty v měřišti způsobené vedením tepla [$W \cdot K^{-1}$]