

VYŠŠÍ ODBORNÁ ŠKOLA, STŘEDNÍ ŠKOLA,
CENTRUM ODBORNÉ PŘÍPRAVY



ABSOLVENTSKÁ PRÁCE

Návrh regulace vytápění laboratorního
domku

Sezimovo Ústí, 2019

Autor: Jakub Marek



ZADÁNÍ ABSOLVENTSKÉ PRÁCE

Student: **Jakub Marek**
Obor studia: 26-41-N/01 Elektrotechnika – mechatronické systémy
Název práce: **Návrh regulace vytápění laboratorního domku**
Anglický název práce: **The heating regulation design of the laboratory house**

Zásady pro vypracování:

1. Popište systém vytápěného domku z laboratoře aplikované informatiky.
2. Vytvořte v prostředí Matlab/Simulink počítačový model pro laboratorní systém vytápěného domku.
3. Proveďte identifikaci systému laboratorního domku. Porovnejte odezvy počítačového modelu a laboratorního systému.
4. Na základě počítačového modelu a senzoru teploty vzduchu navrhnete PID regulátor pro řízení vytápění laboratorního systému.
5. Na základě modelu a senzorů teplot vzduchu v jednotlivých místnostech navrhnete řízení vytápění obou místností pomocí dvou PID regulátorů.
6. Diskutujte možnosti regulace, která využije informace ze senzorů umístěných ve stěnách domku. Navrhnete řízení, které tyto informace využije.
7. Absolventskou práci vypracujte problémově ve struktuře odpovídající vědecké práci.


Doporučená literatura:

- [1] RABÍŇÁK, P. Model vytápěného domku – elektronika (Absolventská práce), VOŠ, SŠ, COP Sezimovo Ústí, Sezimovo Ústí, 2014.
- [2] ROUBAL, J., HUŠEK, P. A KOL. *Regulační technika v příkladech*. Praha: BEN – technická literatura, 2011, ISBN 978-80-7300-260-2.

Vedoucí práce: Ing. Jiří Roubal, Ph.D., VOŠ, SŠ, COP, Sezimovo Ústí
Odborný konzultant práce: Bc. Miroslav Hospodářský, VOŠ, SŠ, COP, Sezimovo Ústí
Oponent práce: Ing. Jiří Bumba, VOŠ, SŠ, COP, Sezimovo Ústí

Datum zadání absolventské práce: **3. 9. 2018**

Datum odevzdání absolventské práce: **11. 5. 2019**


Ing. Jiří Roubal, Ph.D.
(vedoucí práce)



V Sezimově Ústí dne 3. 9. 2018


(ředitel školy)

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou absolventskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

V Sezimově Ústí dne 9.5. 2019



podpis

Poděkování

Děkuji především vedoucímu absolventské práce Ing. Jiřímu Roubalovi, Ph.D. za důsledné vedení, hodnotné rady a velké množství času věnované této práci. Bez jeho pomoci by nejspíše tato práce nikdy nevznikla. Poděkování také patří Vyšší odborné škole za možnost pracovat v Laboratoři aplikované informatiky na modelu vytápěného domku a také za šablonu pro tuto absolventskou práci v prostředí $\text{L}^{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X} 2_{\epsilon}$. Dále bych rád poděkoval akreditované kalibrační laboratoři v Jaderné elektrárně Temelín za kvalitní kalibraci teploměrů. Závěrečné poděkování patří také mé rodině a blízkým za velkou trpělivost a podporu během studia.

Anotace

Tato absolventská práce se zabývá návrhem řízení vytápění laboratorního domku. Nejprve je čtenář stručně seznámen s laboratorním domkem, jeho vlastnostmi a parametry. Následně je popsáno vytvoření počítačového modelu tohoto domku v programu MATLAB/Simulink. Na základě tohoto modelu je poté navržen PID regulátor pro řízení vytápění celého laboratorního domku, respektive obou místností zvlášť. Závěrem jsou diskutovány možnosti regulace pomocí snímačů umístěných ve stěnách domku.

Klíčová slova: vytápění, systém, modelování, PID regulátor, regulace, simulace, MATLAB, Simulink.

Annotation

This graduate thesis deals with the heating regulation design of the laboratory house. At first reader is briefly introduced to the attributes and parameters of the laboratory house. Subsequently the creation of a computer model of this house in computer program MATLAB/Simulink is described. Based on this model a PID controller is designed for heat regulation of the whole house, respectively both rooms separately. In the conclusion possibilities of heating regulation using sensors located inside the walls are discussed.

Key words: heating, system, modelling, PID controller, control, simulation, MATLAB, Simulink.

Obsah

Seznam použitých symbolů	vii
Seznam obrázků	ix
Seznam tabulek	xi
1 Úvod	1
2 Laboratorní model vytápěného domku	3
2.1 Popis konstrukce modelu	4
2.1.1 Elektronika modelu	4
2.2 Kalibrace teploměrů	5
3 Matematicko-fyzikální model domku	9
3.1 Prostup tepla stěnou	11
3.1.1 Stěny bez oken (boční)	12
3.1.2 Stěna se čtyřmi okny (zadní)	13
3.1.3 Stěna se třemi okny a dveřmi (přední)	14
3.1.4 Vícevrstvá stěna (podlaha/strop)	15
3.2 Topná tělesa	16
3.3 Porovnání tepelných toků	17
4 Řízení teploty celého domku	19
4.1 Statické charakteristiky snímačů teplot	20
4.2 Řízení teploty celého domku	22
4.2.1 Identifikace modelu celého domku	22
4.2.1.1 Filtrace signálů ze snímačů teplot	23
4.2.1.2 Identifikace přenosu celého domku	24

4.2.2	Návrh PID regulátoru pro celý domek	25
5	Řízení teploty levé a pravé místnosti	29
5.1	PID regulátor pro levou místnost	30
5.1.1	Identifikace modelu levé místnosti	31
5.1.2	Návrh PID regulátoru pro levou místnost	32
5.2	PID regulátor pro pravou místnost	35
5.2.1	Návrh PID regulátoru pro pravou místnost	37
6	Závěr	41
	Literatura	46
A	Obsah příloženého CD/DVD	I
B	Použitý software	III
C	Časový plán absolventské práce	IV
D	Hodinový rozpočet projektu	V

Seznam použitých symbolů

Symbol	Význam	Jednotka
$C(s)$	přenos regulátoru	-
$d(t)$	poruchový signál (porucha)	-
$e(t)$	regulační odchylka	-
k_D	zesílení derivační složky PID regulátoru	-
k_I	zesílení integrační složky PID regulátoru	-
k_P	zesílení proporcionální složky PID regulátoru	-
$L(s)$	přenos otevřené regulační smyčky	-
$n(t)$	šum měření	-
$P(s)$	přenos systému	-
P_u	dodávaný výkon	W
R_l	odpor levého topného tělesa	Ω
R_r	odpor pravého topného tělesa	Ω
S	plocha stěny	m^2
S_{bw}	plocha zadní stěny	m^2
S_d	plocha dveří	m^2
S_{fr}	plocha podlahy/stropu	m^2
S_{fw}	plocha přední stěny	m^2
S_{sw}	plocha boční stěny	m^2
S_w	plocha okna	m^2
S_{xps}	plocha extrudovaného polystyrenu	m^2
T_a	teplota uvnitř domku	$^{\circ}C$
T_{al}	teplota uvnitř levé místnosti	$^{\circ}C$
T_{ar}	teplota uvnitř pravé místnosti	$^{\circ}C$
T_{out}	teplota okolí domku	$^{\circ}C$

Symbol	Význam	Jednotka
$T(s)$	přenos uzavřené regulační smyčky	-
T_{wl}	teplota stěny levé místnosti	$^{\circ}\text{C}$
T_{wr}	teplota stěny pravé místnosti	$^{\circ}\text{C}$
u_{ac}	elektrické napětí klimatizace	V
u_l	elektrické napětí levého tělesa	V
u_r	elektrické napětí pravého tělesa	V
$u(t)$	akční zásah	-
$w(t)$	žádaná hodnota regulované veličiny	-
$y(t)$	regulovaná veličina	-
α	součinitel přestupu tepla	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
δ	tloušťka stěny	m
δ_d	tloušťka dveří	m
δ_{osb}	tloušťka osb desky	m
δ_{sol}	tloušťka sololitu	m
δ_w	tloušťka oken	m
δ_{xps}	tloušťka extrudovaného polystyrenu	m
λ	měrná tepelná vodivost	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
λ_d	měrná tepelná vodivost dveří	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
λ_{osb}	měrná tepelná vodivost OSB desky	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
λ_{sol}	měrná tepelná vodivost sololitu	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
λ_w	měrná tepelná vodivost oken	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
λ_{xps}	měrná tepelná vodivost extrud. polystyrenu	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
τ	časová konstanta filtru	s
ϕ	tepelný tok	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
ϕ_{bw}	tepelný tok zadní stěnou	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
ϕ_{fr}	tepelný tok podlahou/stropem	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
ϕ_{fw}	tepelný tok přední stěnou	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
ϕ_{sw}	tepelný tok boční stěnou	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
ω_f	filtrační frekvence derivační složky PID regulátoru	rad s^{-1}

Seznam obrázků

1.1	Spotřeba energie v domácnostech podle typu konečného použití	1
2.1	Fotografie modelu vytápěného domku	3
2.2	Topná tělesa a snímače teploty, převzato z (RABIŇÁK, P., 2014)	4
2.3	Blokové schéma modelu vytápěného domku	5
2.4	Kuchyňský teploměr pro měření teploty uvnitř domku	5
2.5	Kalibrační funkce teploměru z levé místnosti domku	7
2.6	Kalibrační funkce teploměru z pravé místnosti domku	8
3.1	Možnosti sdílení tepla (převzato z (https://slideplayer.cz/))	9
3.2	Prostup tepla jednovrstvou stěnou	11
3.3	Boční stěna modelu domku	12
3.4	Tepelný tok jednou boční stěnou domku	12
3.5	Zadní stěna modelu domku	13
3.6	Tepelný tok zadní stěnou modelu domku	13
3.7	Přední stěna modelu domku	14
3.8	Tepelný tok zadní stěnou	14
3.9	Prostup tepla vícevrstvou stěnou	15
3.10	Tepelný tok podlahou/stropem domku	15
3.11	Topná tělesa, převzato z (RABIŇÁK, P., 2014)	16
3.12	Statické převodní charakteristiky topných těles	16
3.13	Porovnání teoretického a reálného tepelného toku	17
4.1	Blokové schéma regulačního obvodu (smyčky)	19
4.2	Komunikační soubor pro systém vytápěného domku	20
4.3	Statické převodní charakteristiky snímačů uvnitř domku	21
4.4	Statické převodní charakteristiky snímačů ve stěnách domku	21
4.5	Statická převodní charakteristika snímače teploty okolí	21

4.6	Odezva domku na vstupní skokový signál	22
4.7	Porovnání filtrovaných signálů – vliv časové konstanty filtru	23
4.8	Identifikace přenosu domku z přechodové charakteristiky	24
4.9	Návrh regulátoru v prostředí <code>sisotool</code>	25
4.10	Regulační obvod modelu domku s PID regulátorem	26
4.11	Regulační obvod systému domku s PID regulátorem	27
4.12	Odezvy domku a jeho modelů na skok žádané hodnoty regulované veličiny	27
4.13	Odezvy na skok žádané hodnoty regulované veličiny při použití filtrace .	28
5.1	Přechodová charakteristika levé místnosti	30
5.2	Identifikace a ručně zadané parametry	31
5.3	Návrh regulátoru v prostředí <code>sisotool</code>	32
5.4	Regulační obvod levé místnosti s PID regulátorem	33
5.5	Odezvy domku a jeho modelu na skok žádané hodnoty regulované veličiny v levé místnosti	33
5.6	Odezvy domku a jeho modelu na skok žádané hodnoty regulované veličiny v levé místnosti	34
5.7	Odezvy domku a jeho modelu na skok žádané hodnoty regulované veličiny v levé místnosti	34
5.8	Přechodová charakteristika pravé místnosti	35
5.9	Identifikace a ručně zadané parametry	36
5.10	Návrh regulátoru v prostředí <code>sisotool</code>	37
5.11	Regulační obvod pravé místnosti s PID regulátorem	38
5.12	Odezvy domku a jeho modelu na skokový signál žádané hodnoty regulované veličiny v pravé místnosti	38
5.13	Odezvy domku a jeho modelu na skokový signál žádané hodnoty regulované veličiny v pravé místnosti	39
5.14	Odezvy domku a jeho modelu na skokový signál žádané hodnoty regulované veličiny v pravé místnosti	39
6.1	Závislost celkového tepelného toku na teplotním spádu	42
6.2	Regulace celého domku při vyšším teplotním spádu	43
6.3	Ověření ustáleného stavu	44
6.4	Vliv akčních členů a ventilátorů na měření teplot	44

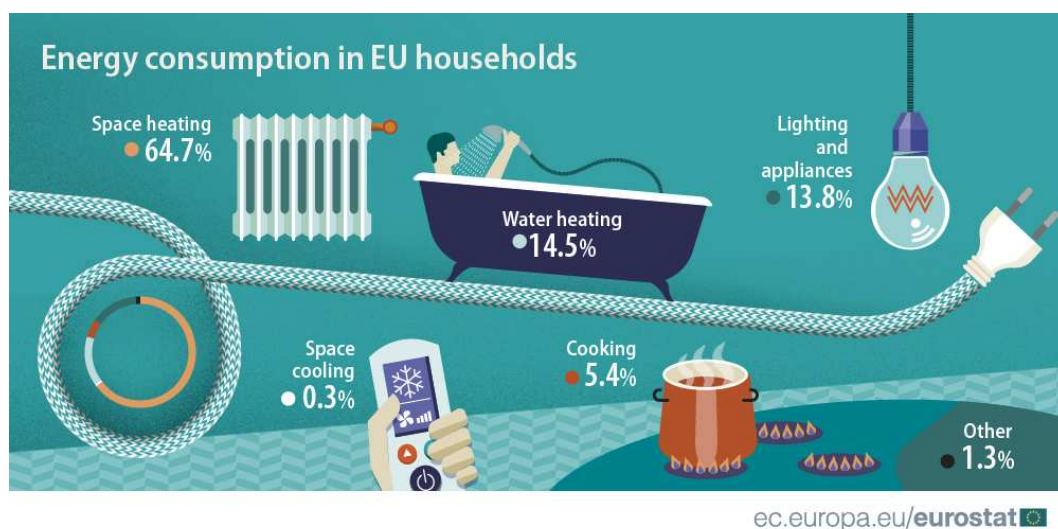
Seznam tabulek

2.1	Kalibrační funkce teploměru z levé místnosti domku	7
2.2	Kalibrační funkce teploměru z pravé místnosti domku	8
3.1	Parametry laboratorního domku	10
D.1	Hodinový rozpočet projektu	V

Kapitola 1

Úvod

Každá domácnost musí platit za energie. Velký podíl spotřebované energie připadá na vytápění. Mnohdy je možné slyšet, že jde o 60 až 70 procent nákladů na energie. Pokud tedy chce domácnost ušetřit na energiích, je nejrozumnější zaměřit se právě na vytápění. Často se dnes mluví o zateplování, či výměně oken. Co když ale má být snížena spotřeba i po těchto stavebních úpravách? Toho lze docílit správným řízením vytápění.



Obrázek 1.1: Spotřeba energie v domácnostech podle typu konečného použití, převzato z (<https://ec.europa.eu/eurostat>)

Na Vyšší odborné škole, Střední škole, Centru odborné přípravy v Sezimově Ústí se nachází Laboratoř aplikované informatiky a fyziky. Zde jsou umístěny různé modely zastupující základní fyzikální oblasti (ROUBAL, J., 2012). Jedním z těchto modelů je i model laboratorního domku, na kterém si lze vyzkoušet již navržený regulátor pro vytápění.

Zkušenosti z návrhu regulátoru pro laboratorní domek lze přenést na libovolnou budovu. Stačí změnit parametry domku na parametry budovy, která má být regulována.

Laboratorní domek byl vytvořil v rámci absolventské práce (RABIŇÁK, P., 2014). V této byl také navržen matematicko-fyzikální model domku. Ten ale neuvažoval prostup tepla okny a dveřmi, což je podstatné pro přesnost simulací, nutných k správné identifikaci domku a návrhu regulátoru. Z tohoto důvodu budou upraveny matematicko-fyzikální rovnice sloužící k vytvoření stavového modelu. Tvorba modelu domku i návrh PID regulátoru pro řízení vytápění vychází z metod popsanych v (ROUBAL, J. et al., 2011).

Cílem této práce je vytvořit model laboratorního domku, provést jeho identifikaci a na jejím základě navrhnout PID regulátor pro řízení teploty uvnitř domku. Dalším cílem je vytvořit modely jednotlivých místností zvlášť, provést jejich identifikaci a opět navrhnout PID regulátory pro řízení teplot v obou místnostech. Posledním cílem je navrhnout využití snímačů teplot, které jsou umístěny ve stěnách laboratorního domku.

Struktura této práce, která je napsána v $\text{L}^{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X} 2_{\epsilon}^1$ (SCHENK, C., 2009), je následující. V kapitole 2 je stručné seznámení s laboratorním modelem vytápěného domu, jeho elektronikou a kalibrací teploměrů. Kapitola 3 se zabývá tvorbou matematicko-fyzikálního modelu laboratorního domku. V kapitole 4 se nachází identifikace laboratorního domku a návrh PID regulátoru pro celý domek. Kapitola 5 obsahuje identifikaci, návrh a regulaci levé i pravé místnosti zvlášť. V závěru jsou popsány dosažené výsledky této práce, analýza problémů této práce a je doporučen další postup. V přílohách práce je uveden obsah přiloženého DVD, použitý software, časový plán AP a hodinový rozpočet tohoto projektu.

¹ $\text{L}^{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X} 2_{\epsilon}$ je rozšíření systému $\text{L}^{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$, což je kolekce maker pro $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$. $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ je ochranná známka American Mathematical Society.

Kapitola 2

Laboratorní model vytápěného domku

V této kapitole je uveden stručný popis laboratorního domku, který je součástí Laboratoře aplikované informatiky a fyziky na Vyšší odborné škole, Střední škole a Centru odborné přípravy v Sezimově Ústí. Tato učební pomůcka z části vznikla v rámci absolventské práce Petra Rabiňáka (RABIŇÁK, P., 2014). Na jejím dokončení se dále podílelo několik studentů vyšší odborné školy, zejména Lukáš Sedlák, který opatřil domek střechou a výkresovou dokumentací, kterou lze nalézt v příloze této práce. Fotografie modelu vytápěného domku je na následujícím obrázku.



Obrázek 2.1: Fotografie modelu vytápěného domku

2.1 Popis konstrukce modelu

Model vytápěného domku je model reálného domu v měřítku 1:20. Domek se skládá ze čtyř stěn, podlahy, stropu a střechy. Jeho stěny jsou vyrobeny z OSB desek, které byly použity vzhledem k jejich izolačním a akumulacním vlastnostem a kvůli nízké pořizovací ceně (RABIŇÁK, P., 2014). Uvnitř domku se nachází dvě místnosti, v každé z nich je topné těleso. Dále jsou zde snímače teplot a chladicí jednotky simulující klimatizaci. Pod střechou je umístěna veškerá elektronika umožňující komunikaci s počítačem. Rozměry domku jsou $40 \times 40 \times 38$ cm s tloušťkou stěn 2,2 cm. Domek má sedm oken a jedny dveře. Okna v modelu jsou vyrobena z plexiskla a lze jimi také odečítat teploty na teploměrech uvnitř domku. Rozměry oken jsou 6×7 cm s tloušťkou 5 mm (RABIŇÁK, P., 2014).

2.1.1 Elektronika modelu

Elektronika vytápěného domku, která umožňuje připojit model k počítači s prostředím MATLAB/Simulink a měřicí kartou MF 624, byla navržena a vyrobena v rámci absolventské práce (RABIŇÁK, P., 2014). V domku je možno topit pomocí výkonových rezistorů, ze kterých jsou sestavena dvě topná tělesa. Teploty vzduchu a stěn jsou měřeny pomocí čidel teploty Ni 1000. Kompletní zapojení elektroniky je možno nalézt v (RABIŇÁK, P., 2014).



(a) topná tělesa

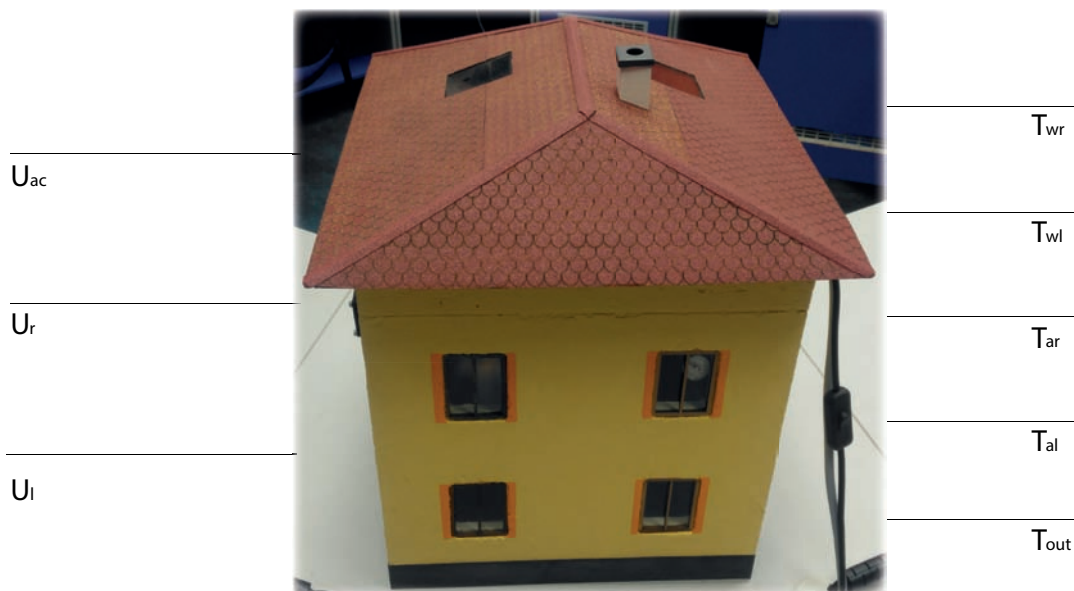


(b) čidlo Ni 1000

Obrázek 2.2: Topná tělesa a snímače teploty, převzato z (RABIŇÁK, P., 2014)

Z hlediska této práce, tj. modelování tohoto systému a jeho následné regulace, jsou zásadní vstupy a výstupy tohoto modelu. Vstupy modelu jsou tři, a to napětí na topném tělese v levé místnosti u_l [V], napětí na topném tělese v pravé místnosti u_r [V] a napětí na klimatizačních jednotkách u_{ac} [V]. Výstupů má model pět, a to teploty vzduchu v levé a pravé místnosti T_{al} , T_{ar} [°C], teploty stěn v levé a pravé místnosti T_{wl} , T_{wr} [°C] a teplotu

okolního vzduchu T_{out} [°C]. T_{out} je z hlediska měření výstupním signálem, ale z hlediska modelování tepelných jevů je nezávislým vstupem.



Obrázek 2.3: Blokové schéma modelu vytápěného domku

2.2 Kalibrace teploměrů

Teplota vzduchu uvnitř domku je měřena kuchyňskými analogovými teploměry, viz obr. 2.4. Tyto teploměry byly zvoleny s ohledem na dva základní požadavky. Jedním byly rozměry teploměru umožňující sledování vnitřní teploty skrze okno. Druhým požadavkem byl rozsah měřené veličiny, která se v laboratorních podmínkách může pohybovat od 20 °C do cca 90 °C.



Obrázek 2.4: Kuchyňský teploměr pro měření teploty uvnitř domku

Protože se jedná o kuchyňské teploměry, u nichž není garantována vysoká přesnost, kterou vyžadují následující experimenty, byla nejprve provedena kalibrace těchto teploměrů v akreditované kalibrační laboratoři v Jaderné elektrárně Temelín. Kalibrace přímoukazujících teploměrů se skládala z těchto kroků:

- temperování,
- vnější prohlídky,
- zkoušky stálosti údajů,
- zkoušky správnosti údajů.

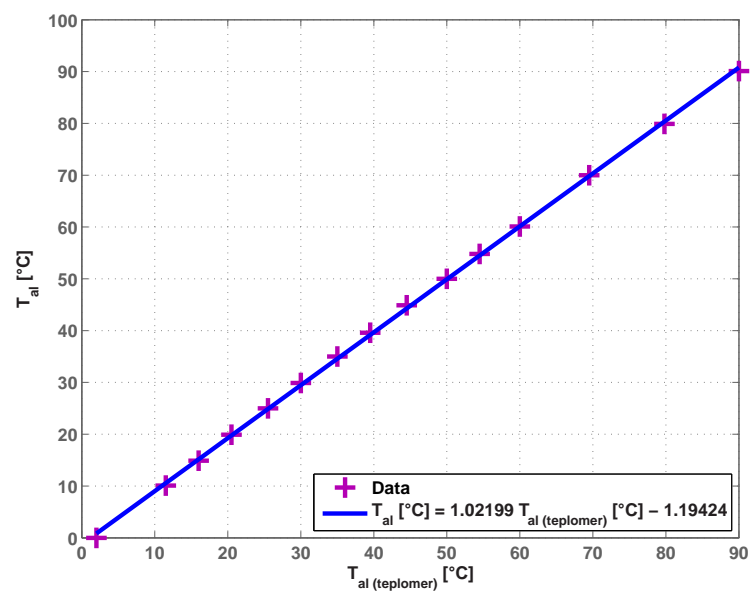
Teploměr se před započítím kalibrace temperuje v laboratorních podmínkách při teplotě $23 \pm 5^\circ\text{C}$ pomocí klimatizačních jednotek po dobu 30 minut. Následně je provedena zkouška stálosti údajů teploměru, což se provede tak, že se teploměr ponoří do nulové lázně a po ustálení teploty se odečte teplota na měřeném teploměru. Teploměr se poté pomalu ponoří do kapalné lázně s teplotou odpovídající maximální teplotě vyznačené na kontrolovaném teploměru. V této lázni je ponechán minimálně 3 hodiny. Poté se teploměr pomalu ochladí na teplotu okolního prostředí, ochlazený se opět vloží do nulové lázně a po ustálení teploty se odečte teplota na měřeném teploměru.

Při zkoušce správnosti údajů (kalibraci) teploměrů je porovnávána teplota, která je odečítána na stupnici kalibrovaných teploměrů s referenční teplotou teploměru etalového (kontrolního), který je součástí kalibrační pece. Měření se provádí od nejnižšího údaje směrem nahoru a údaje jsou odečítány po ustálení teplot lázně a teploměrů. U analogového (ručkového) teploměru se údaj odečítá přímo nebo pomocí zvětšovacího zařízení (lupa, kamera), které je umístěno tak, aby čtený úsek byl uprostřed zorného pole a aby byl vyloučen vliv paralaxy. Odečet se provádí až na desetinu dílku s ohledem na jemnost stupnice měřeného teploměru. Konkrétně u teploměrů z domku se prováděl odečet na jednu čtvrtinu dílku, to je na $0,25^\circ\text{C}$. Naměřená data jsou uvedena v následujících tabulkách a grafech.

Z těchto dat byla následně vytvořena kalibrační funkce pomocí skriptu `stf`, který byl vytvořen v rámci studentských prací pro prostředí MATLAB. Ta převádí naměřenou teplotu z teploměrů na skutečnou teplotu. Údaje odečtené z teploměrů byly přepočítány podle kalibračních funkcí a použity v následujících kapitolách. Skript, který tyto kalibrační funkce zobrazí, se jmenuje `STFthermometers.m`. Od této chvíle byly hodnoty z teploměrů vždy přepočítávány pomocí těchto kalibračních funkcí.

Tabulka 2.1: Kalibrační funkce teploměru z levé místnosti domku

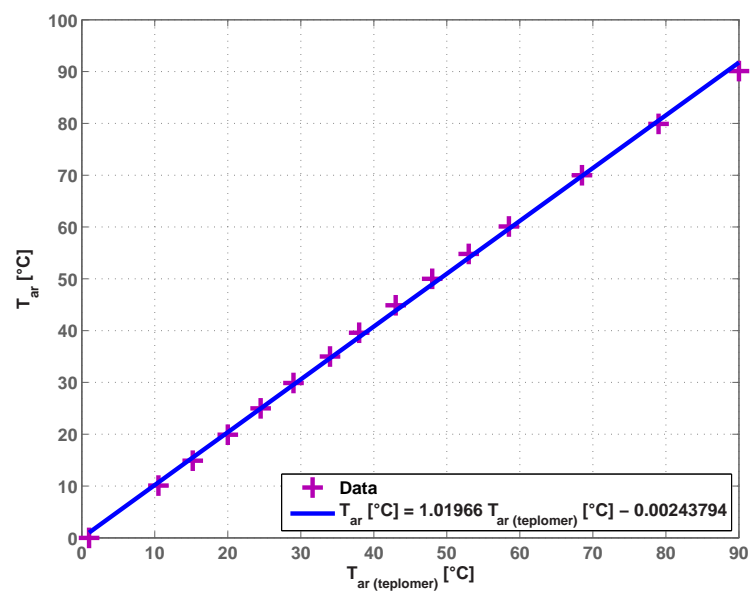
Ethalonová teplota T_{al} [°C]	Teplota na teploměru T_{al} [°C]
0,0	2,0
10,1	11,5
14,9	16,0
19,9	20,5
25,0	25,5
29,9	30,0
35,0	35,0
39,6	39,5
44,9	44,5
50,0	50,0
54,8	54,5
60,1	60,0
70,0	69,5
79,9	79,8
90,1	90,0



Obrázek 2.5: Kalibrační funkce teploměru z levé místnosti domku

Tabulka 2.2: Kalibrační funkce teploměru z pravé místnosti domku

Ethalonová teplota T_{ar} [°C]	Teplota na teploměru T_{ar} [°C]
0,0	1,0
10,1	10,5
14,9	15,2
19,9	20,0
25,0	24,5
29,9	29,0
35,0	34,0
39,6	38,5
44,9	43,0
50,0	48,0
54,8	53,0
60,1	58,5
70,0	68,5
79,9	79,0
90,1	90,0

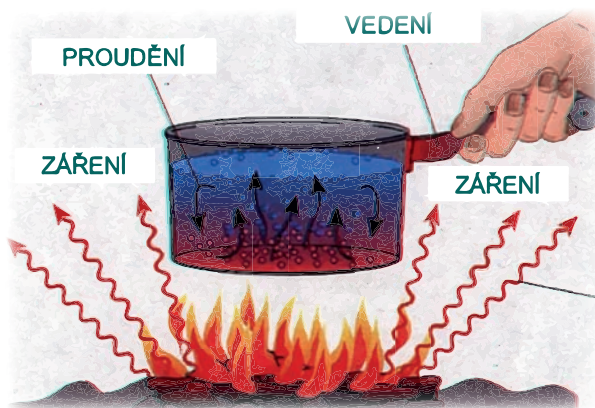


Obrázek 2.6: Kalibrační funkce teploměru z pravé místnosti domku

Kapitola 3

Matematicko-fyzikální model vytápěného domku

Přenos nebo také sdílení tepla je komplexní fyzikální děj. Sdílení tepla lze rozdělit na tyto způsoby: vedením (kondukcí), prouděním (konvekcí) a sáláním (zářením, radiací). Pro usnadnění tvorby modelu, který vychází z matematicko-fyzikálního popisu, bylo potřeba zavést několik zjednodušení sledovaných dějů.



Obrázek 3.1: Možnosti sdílení tepla (převzato z <https://slideplayer.cz/>)

Ke sdílení tepla vedením dochází v nestejně ohřáté stěně mezi jejími částmi s různou teplotou. Teplo prostupuje z teplejší části desky uvnitř domku do chladnější oblasti vně domku. Sdílení tepla prouděním dochází u plynu při styku s pevnou stěnou kvůli rozdílné teplotě i hustotě vzduchu. Prostup tepla stěnou domku je tedy kombinací sdílení tepla prouděním vzduchu u povrchu stěny, vedením stěnou a znovu prouděním (VOLF, I. et al., 2013).

Při ustálené teplotě se tedy tepelný tok unikající z domu a tepelný tok tělesa rovnají. Pokud tomu tak není, domek se buď natápí nebo chladne. Takto ustálený stav není výpočetně složitý a vychází ze středoškolské fyziky o prostupu tepla stěnou, respektive o prostupu tepla vícevrstvou stěnou.

V této kapitole byl vytvořen matematický model popisující tepelné toky jednotlivých stěn, které se následně sečetly a poté porovnaly s tepelným tokem naměřeným na systému vytápěného domku. Postupovalo se nejprve od stěn bez oken a dveří přes stěny s okny i dveřmi až po podlahu a strop. Poté se porovnal reálný tepelný tok unikající z domku v ustáleném stavu s teoretickými výpočty z následujících podkapitol. Pro matematický model v této kapitole byly použity parametry z následující tabulky.

Tabulka 3.1: Parametry laboratorního domku

Parametr	Hodnota	Jednotka	Popis
λ_{osb}	0,13	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	měrná tep. vodivost OSB
δ_{osb}	0,022	m	tloušťka OSB
S_{sw}	$(380 - 22) \times 300 \times 10^{-6}$	m^2	plocha boční stěny ¹
$S_{\text{fw}}, S_{\text{bw}}$	$(400 - 22) \times 300 \times 10^{-6}$	m^2	plocha přední a zadní stěny
α	5,5	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	součinitel prostupu tepla
λ_{d}	0,13	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	měrná tep. vodivost dveří
δ_{d}	0,022 – 0,009	m	tloušťka dveří
S_{d}	$110 \times 65 \times 10^{-6}$	m^2	plocha dveří
λ_{w}	0,19	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	měrná tep. vodivost oken
δ_{w}	0,005	m	tloušťka oken
S_{w}	$60 \times 75 \times 10^{-6}$	m^2	plocha oken
λ_{xps}	0,032	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	měrná tep. vodivost XPS ²
S_{xps}	$(380 - 22) \times (400 - 22) \times 10^{-6}$	m^2	plocha XPS
δ_{xps}	0,022	m	tloušťka XPS
λ_{sol}	0,038	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	měrná tep. vodivost sololitu
δ_{sol}	0,004	m	tloušťka sololitu
S_{fr}	$(380 - 22) \times (400 - 22) \times 10^{-6}$	m^2	plocha podlahy/stropu

¹V tabulce jsou obsahy ploch stěn napsány tak, aby bylo jasné, jak se k nim přišlo (výška krát šířka), viz následující obrázky s výkresovou dokumentací.

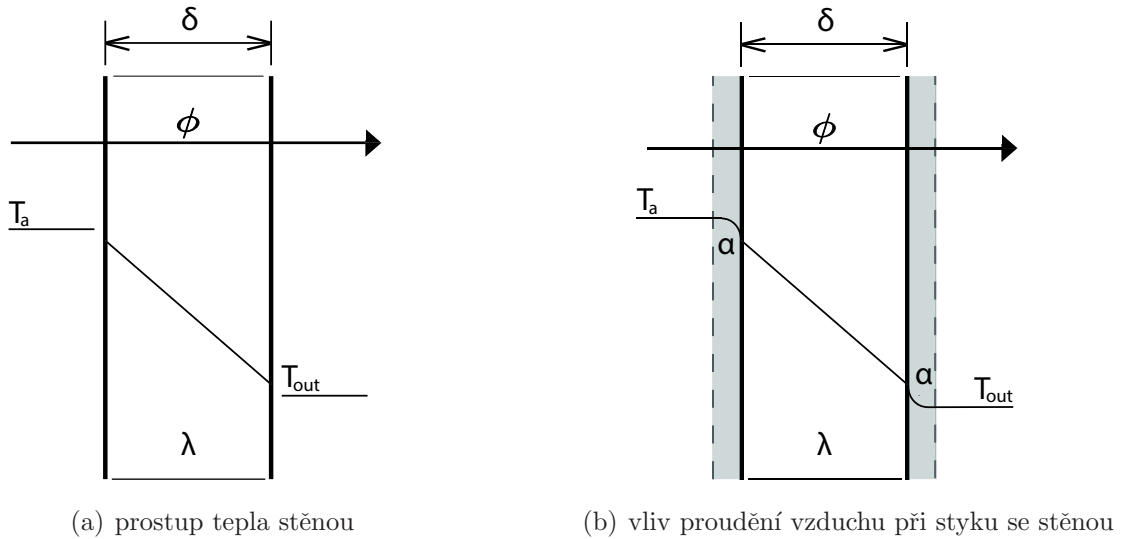
²XPS je zkratka pro extrudovaný polystyren.

3.1 Prostup tepla stěnou

V desce o jednotné tloušťce δ [m], jejíž strany jsou udržovány na konstantních teplotách T_a , T_{out} [°C], kde $T_a > T_{out}$, proudí teplo jen kolmo k povrchovým plochám, jak lze vidět na obr. 3.2(a). Velikost tepelného toku je dána vztahem

$$\phi = \lambda \frac{S}{\delta} (T_a - T_{out}), \quad (3.1)$$

kde λ [W m⁻¹ K⁻¹] je měrná tepelná vodivost materiálu stěny, S [m²] je obsah plochy stěny a δ [m] je tloušťka stěny.



Obrázek 3.2: Prostup tepla jednovrstvou stěnou

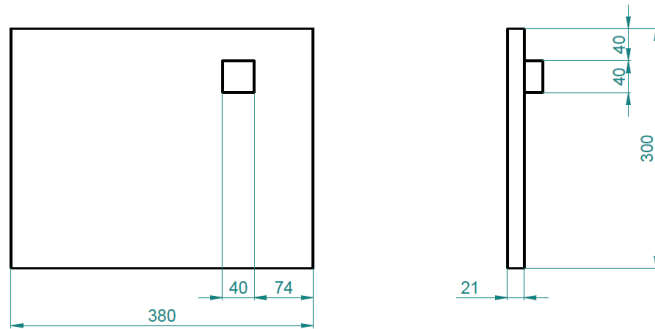
Těsně u stěny se tvoří mezní vrstva vzduchu, ve které se teplota rychle a nelineárně mění. Tomuto jevu se říká tepelný skok, viz obr. 3.2(b). Množství tepla, které přejde za určitý čas plochou S [m²] ze vzduchu o teplotě T_a [°C] přes stěnu do vzduchu o teplotě T_{out} [°C], je možné vyjádřit jako

$$\phi = \frac{S}{\frac{2}{\alpha} + \frac{\delta}{\lambda}} (T_a - T_{out}),$$

kde konstanta α [W m⁻¹ K⁻¹] se nazývá součinitel přestupu tepla. Tento součinitel hraje velkou roli při posuzování přestupu tepla a je závislý na celé řadě veličin, typických pro danou látku a daný stav proudění. Nejde tedy o materiálovou konstantu, jakou je např. tepelná vodivost (PEKÁREK, S.; MURLA, M., 1997, str. 122 až 124).

3.1.1 Stěny bez oken (boční)

Stěny bez oken jsou z hlediska výpočtu tepelného toku ty nejjednodušší, protože se počítá tepelný tok pouze jedním materiálem a jednou vrstvou. Na boční stěně domku je umístěn Peltierův článek, který zastává funkci klimatizace, viz obr. 3.3. Tepelný tok touto klimatizací se v této práci zanedbává.

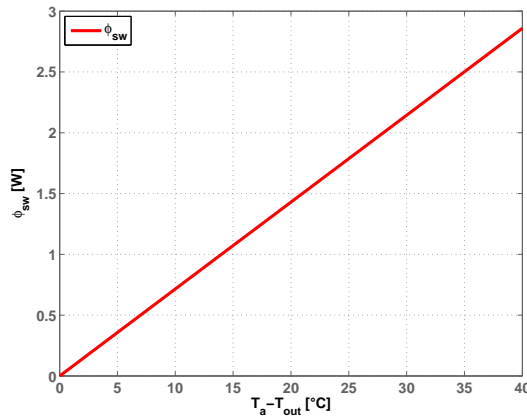


Obrázek 3.3: Boční stěna modelu domku

Model domku má tyto stěny celkem dvě. Tepelný tok jednou boční stěnou bez klimatizace je dán vztahem

$$\phi_{sw} = \frac{S_{sw}}{\frac{2}{\alpha} + \frac{\delta_{osb}}{\lambda_{osb}}} (T_a - T_{out}), \quad (3.2)$$

kde λ_{osb} [$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$] je měrná tepelná vodivost OSB desky, S_{sw} [m^2] je obsah plochy stěny, δ_{osb} [m] je tloušťka stěny a T_a , T_{out} [$^{\circ}\text{C}$] jsou teploty vzduchu uvnitř domku, respektive vně domku. Na následujícím obrázku je znázorněna závislost tepelného toku (3.2) na rozdílu vnitřní a vnější teploty vzduchu.



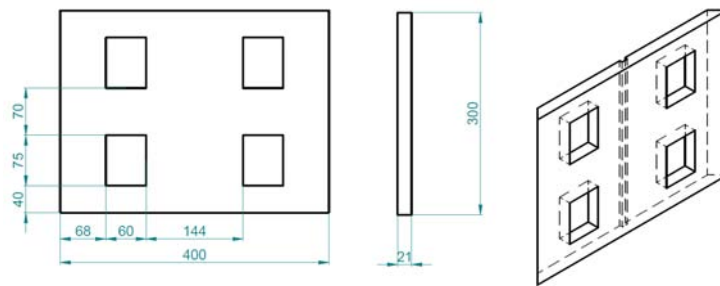
Obrázek 3.4: Tepelný tok jednou boční stěnou domku

3.1.2 Stěna se čtyřmi okny (zadní)

Tepelný tok stěnou se čtyřmi okny lze rozdělit na tepelný tok OSB deskou ϕ_{osb} [W] a tepelný tok okny ϕ_w [W]. Celkový tepelný tok touto stěnou je pak dán vztahem

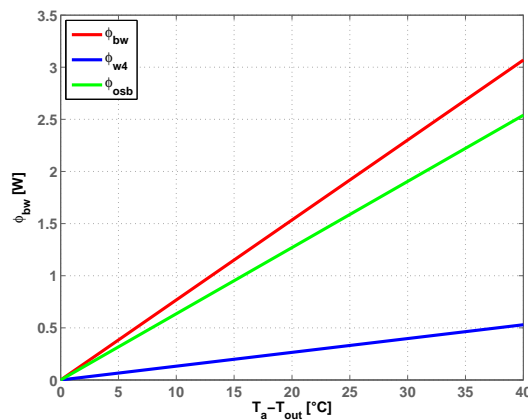
$$\phi_{bw} = \left[(S_{bw} - 4S_w) \frac{1}{\frac{2}{\alpha} + \frac{\delta_{osb}}{\lambda_{osb}}} + S_w \frac{4}{\frac{2}{\alpha} + \frac{\delta_w}{\lambda_w}} \right] (T_a - T_{out}), \quad (3.3)$$

kde λ_w [$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$] je měrná tepelná vodivost okna, S_{bw} [m^2] je obsah plochy stěny (včetně oken), S_w [m^2] je obsah plochy jednoho okna a δ_w [m] je tloušťka okna (plexiskla).



Obrázek 3.5: Zadní stěna modelu domku

Okna zaujímají na této stěně plochu 15 % a uniká jimi přibližně 20 % tepla, jak lze vidět na obr. 3.6. To je dáno tím, že měrná tepelná vodivost oken je 1,5krát větší než měrná tepelná vodivost OSB desky a zároveň tloušťka plexiskla je 4,4krát menší. U domů se může uvažovat i to, že okna vpouští do budovy sluneční energii a tak se celková energie může lišit oproti stavebním výpočtům. V případě modelu domku jsou tyto vlivy zanedbány a kontrolovány (zatažením rolet v laboratoři).



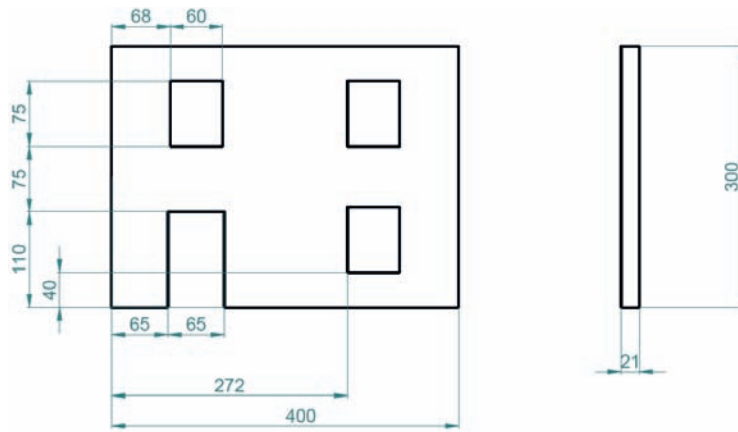
Obrázek 3.6: Tepelný tok zadní stěnou modelu domku

3.1.3 Stěna se třemi okny a dveřmi (přední)

Na přední stěně modelu domku jsou tři okna a dveře. Dveře jsou v případě laboratorního modelu domku jen výřez ve tvaru obdélníka do OSB desky, takže mají stejné konstanty jako OSB deska kromě tloušťky materiálu. Tepelný tok touto přední stěnou je dán vztahem

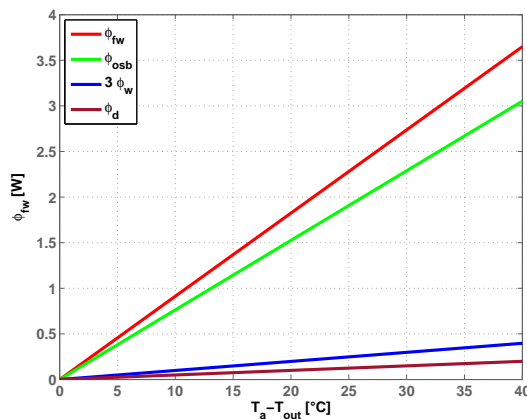
$$\phi_{fw} = \left[(S_{fw} - 3S_w - S_d) \frac{1}{\frac{2}{\alpha} + \frac{\delta_{osb}}{\lambda_{osb}}} + S_w \frac{3}{\frac{2}{\alpha} + \frac{\delta_w}{\lambda_w}} + S_d \frac{1}{\frac{2}{\alpha} + \frac{\delta_d}{\lambda_d}} \right] (T_a - T_{out}),$$

kde λ_d [$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$] je měrná tepelná vodivost dveří, S_d [m^2] je obsah plochy dveří a δ_d [m] je tloušťka dveří.



Obrázek 3.7: Přední stěna modelu domku

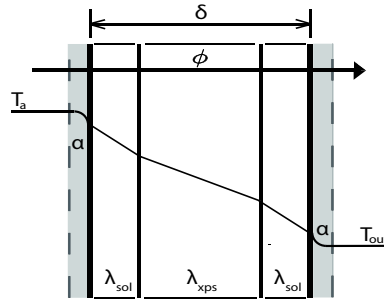
Na obr. 3.8 lze vidět, že tepelný tok ϕ_{osb} se podílí na celkovém tepelném toku takovouto stěnou nejvíce. Tepelné toky okny ϕ_w a dveřmi ϕ_d se projevují poměrně malým dílem.



Obrázek 3.8: Tepelný tok zadní stěnou

3.1.4 Vícevrstvá stěna (podlaha/strop)

Podlaha a strop domku se skládá ze tří vrstev různé tloušťky a různé tepelné vodivosti při stejné ploše. Vrstvy se v případě domku skládají z extrudovaného polystyrenu, který je uprostřed, a sololitu po stranách.

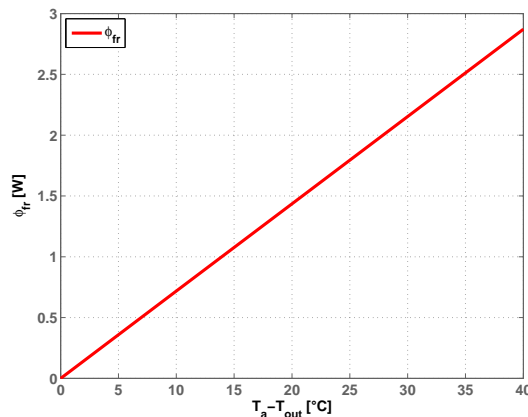


Obrázek 3.9: Prostup tepla vícevrstvou stěnou

Výpočet vychází z výpočtu prostupu tepla vícevrstvou stěnou. Jedná se vlastně o posloupenost prostupů tepla vrstvami. Pro tepelný tok takto složenou stěnou platí následující vztah

$$\phi_{fr} = S_{fr} \frac{T_a - T_{out}}{\frac{2}{\alpha} + \frac{\delta_{sol}}{\lambda_{sol}} + \frac{2}{\alpha} + \frac{\delta_{xps}}{\lambda_{xps}}},$$

kde S_{fr} [m^2] je obsah plochy podlahy/stropu, λ_{sol} , λ_{xps} [$W m^{-1} K^{-1}$] jsou měrné tepelné vodivosti sololitu a extrudovaného polystyrenu a δ_{sol} , δ_{xps} [m] jsou tloušťky sololitu a extrudovaného polystyrenu. Na obr. 3.10 je znázorněna závislost tohoto tepelného toku na rozdílu vnitřní a vnější teploty vzduchu.



Obrázek 3.10: Tepelný tok podlahou/stropem domku

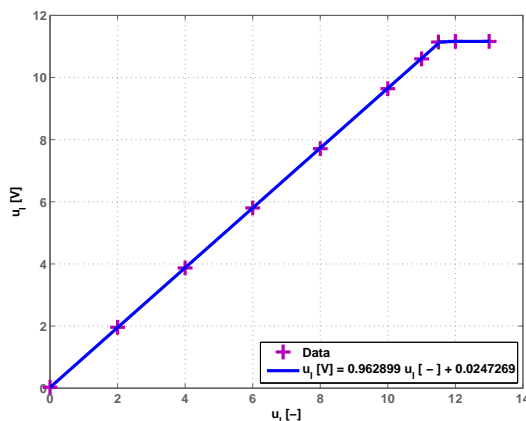
3.2 Topná tělesa

Topná tělesa jsou jediným zdrojem tepelné energie vytápěného domku a z hlediska systému jsou akčním členem. Napájena jsou stejnosměrným napětím 12 V při maximálním proudu 2 A. Každé těleso má tedy maximální výkon přibližně 24 W a skládá se z deseti výkonových rezistorů zapojených do série, viz obr. 3.11. Bližší informace je možné nalézt v (RABIŇÁK, P., 2014)

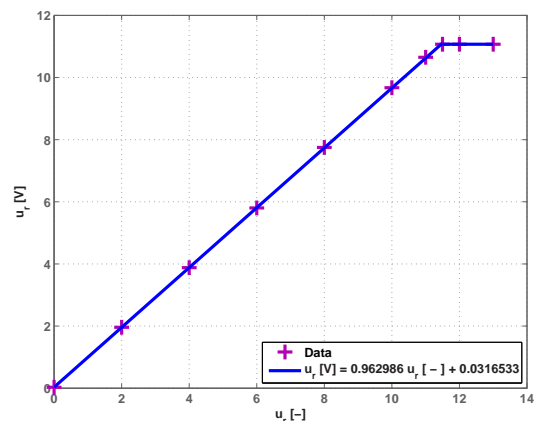


Obrázek 3.11: Topná tělesa, převzato z (RABIŇÁK, P., 2014)

Pro potřeby analýzy v následující podkapitole bylo třeba určit statické převodní charakteristiky topných těles. Ty byly získány tak, že se nejdříve zjistil odpor topných těles, a to jak při pokojové teplotě, tak při půlhodinovém ohřevu domku s maximálním napětím. Naměřená hodnota byla $R = 5,75 \Omega$. Poté se nastavil řídicí signál v prostředí MATLAB/Simulink a po ustálení se odečetla hodnota napětí na topných tělesech. Takto se postupovalo po 2 V až do pásma saturace, v jehož okolí bylo naměřeno více hodnot pro větší přesnost. Na následujícím obrázku jsou znázorněny tyto charakteristiky.



(a) topné těleso v levé místosti



(b) topné těleso v pravé místosti

Obrázek 3.12: Statické převodní charakteristiky topných těles

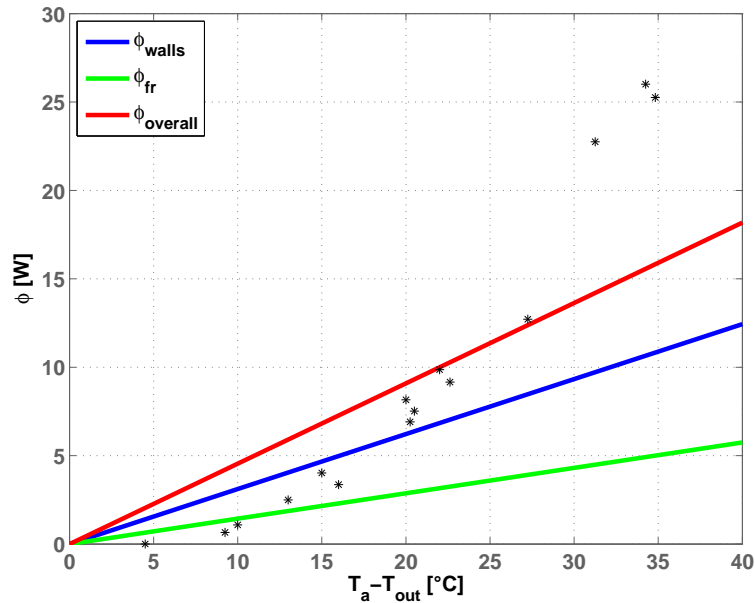
3.3 Porovnání tepelných toků

Celkový tepelný tok je dán součtem tepelných toků všech stěn, podlahy a stropu. Takto vypočtený tepelný tok byl porovnán s naměřeným (reálným) tepelným tokem. Ten byl získán následujícím způsobem. Domek byl natopen na požadovanou ustálenou teplotu T_a , což trvá řádově hodiny. Následně byl zaznamenán řídicí signál topných těles, který byl přepočítán podle statických charakteristik z obr. 3.12. Z tohoto napětí a ze znalosti odporu topných těles byl určen skutečný dodávaný výkon dle vztahu

$$P_u = \frac{U_l^2}{R_l} + \frac{U_r^2}{R_r}$$

kde R_l , R_r [Ω] jsou odpory topných těles v levé a v pravé místnosti. U_l , U_r jsou napětí na topných tělesech.

Takto byl získán jeden bod na grafu závislosti tepelného toku na rozdílu teplot $T_a - T_{out}$. Těchto bodů bylo změřeno a určeno několik, aby je bylo možné porovnat s teoretickými výpočty z předchozích podkapitol, viz obr. 3.13.



Obrázek 3.13: Porovnání teoretického a reálného tepelného toku

Na obr. 3.13 tedy znázorňuje červená přímka celkový tepelný tok v ustáleném stavu na základě matematického popisu. Hvězdičky znázorňují naměřený tepelný tok na modelu domku. Celkový tepelný tok na základě matematického popisu neodpovídal naměřeným datům. Dokonce podle naměřených dat nebyla závislost tepelného toku na rozdílu teplot

ani lineární. Při menším tepelném spádu T_a a T_{out} byl moc malý a naopak při velkém rozdílu teplot byl reálný tepelný tok vyšší než teoretický tepelný tok. To může být způsobeno více faktory jako je klimatizace domku a další, které autor této práce nebyl schopen vysvětlit v době psaní této kapitoly. Tyto možné vlivy byly ponechány k analýze do závěru této práce.

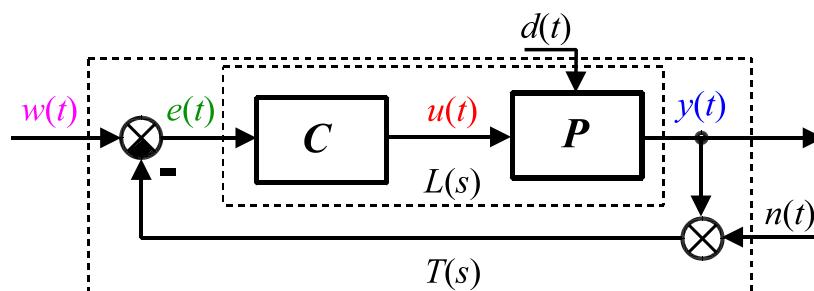
Kapitola 4

Řízení teploty celého domku

V této kapitole bude nejprve provedena identifikace systému vytápěného domku, tj. bude nalezena matematicko-počítačová interpretace laboratorního domku. Na základě tohoto modelu bude navržen PID regulátor pro řízení teploty uvnitř domku pomocí topných těles. Regulátor bude poté otestován s počítačovým modelem a posléze aplikován na reálný laboratorní domek.

Pro regulaci bude použit standardní regulační obvod (smyčka), viz následující obrázek. Regulační obvod se skládá z regulátoru (bloček C) a z řízeného systému (bloček P). V regulačním obvodu se nacházejí následující signály: $y(t)$ je regulovaná veličina, $w(t)$ je žádaná hodnota regulované veličiny, $e(t)$ je regulační odchylka definovaná vztahem $e(t) = w(t) - y(t)$ (záporná zpětná vazba), $u(t)$ je akční zásah, $d(t)$ je poruchový signál (porucha) a $n(t)$ reprezentuje šum měření. Čárkované ohraničení představuje přenos otevřené regulační smyčky $L(s) = P(s)C(s)$, respektive přenos uzavřené regulační smyčky

$$T(s) = \frac{L(s)}{1 + L(s)}.$$

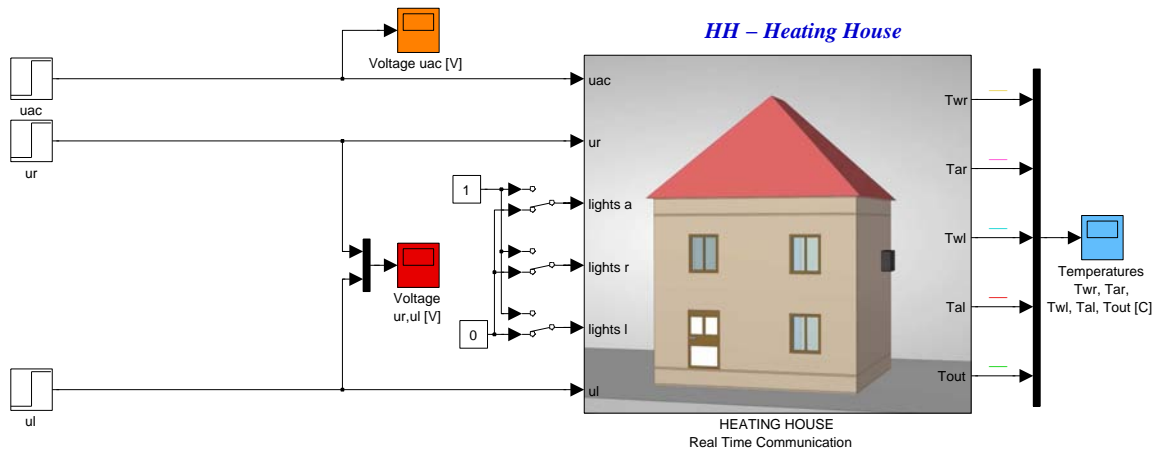


Obrázek 4.1: Blokové schéma regulačního obvodu (smyčky) – převzato z (ROUBAL, J. et al., 2011, obrázek 14.1)

4.1 Statické charakteristiky snímačů teplot

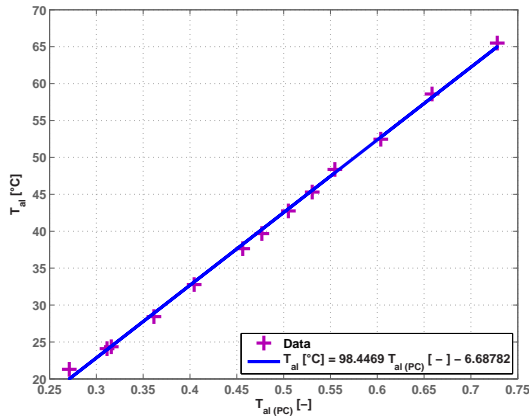
Jak již bylo zmíněno v kapitole 2, domek je vybaven pěti odporovými snímači teploty Ni1000 s převodní elektronikou (RABIŇÁK, P., 2014). Signály ze snímačů jsou přivedeny na analogové vstupy měřicí karty MF 624 (HUMUSOFT, 2019), díky které lze zobrazit hodnoty unifikovaných signálů v prostředí MATLAB/Simulink (THE MATHWORKS, 2019). Pro další měření a regulaci je nezbytné tyto unifikované signály převést na teploty ve stupních Celsia. Proto byly nejprve změřeny a následně určeny statické převodní charakteristiky snímačů teplot (ROUBAL, J., 2012).

Data k vytvoření těchto statických charakteristik byla získána následujícím postupem. Nejprve byly odečteny teploty na teploměrech uvnitř domku. Tyto teploty byly poté převedeny na skutečné teploty pomocí kalibračních funkcí, které jsou na obr. 2.5 a obr. 2.6. Dále byly změřeny hodnoty unifikovaných signálů z těchto snímačů pomocí následujícího simulinkového komunikačního souboru `HeatingHouse\HH_rt.mdl`. Tímto způsobem byl získán první bod statické převodní charakteristiky každého snímače teploty.

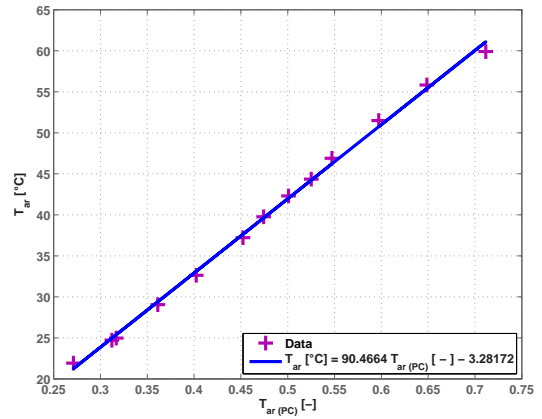


Obrázek 4.2: Komunikační soubor pro systém vytápěného domku

Poté byl domek pomocí topných těles natopen na maximální teplotu. Po ustálení teplot byly znovu zaznamenány hodnoty unifikovaných signálů a teploty na teploměrech (včetně kalibračních přepočtů). Během následujícího klesání teploty v domku byly tyto záznamy několikrát zopakovány z důvodu odstranění chyby měření způsobené šumem snímačů. Nakonec byly pomocí skriptu `HeatingHouse\statchar_Ni1000.m` určeny statické převodní charakteristiky snímačů teplot, které jsou zobrazeny na následujících obrázcích. Z těchto obrázků je vidět, že jsou převodní charakteristiky na celém měřicím rozsahu lineární.

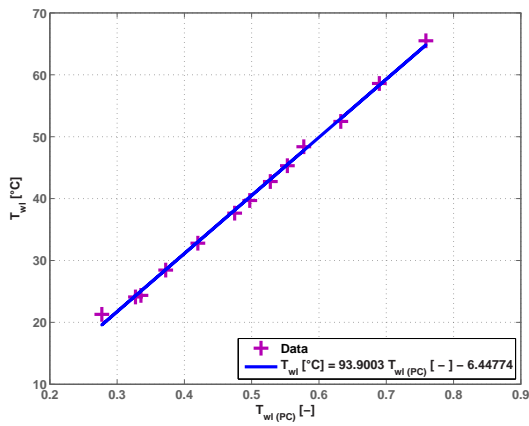


(a) teplota vzduchu v levé místnosti

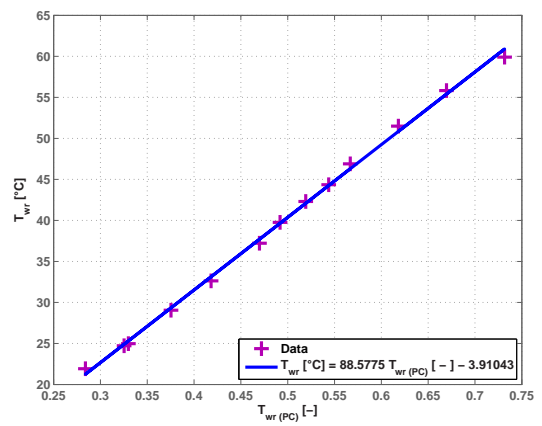


(b) teplota vzduchu v pravé místnosti

Obrázek 4.3: Statické převodní charakteristiky snímačů uvnitř domku

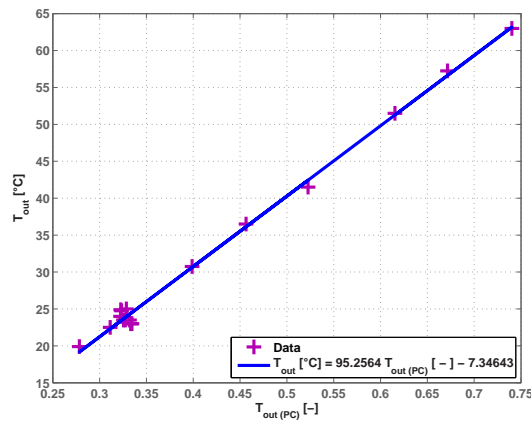


(a) teplota u levé místnosti



(b) teplota u pravé místnosti

Obrázek 4.4: Statické převodní charakteristiky snímačů ve stěnách domku



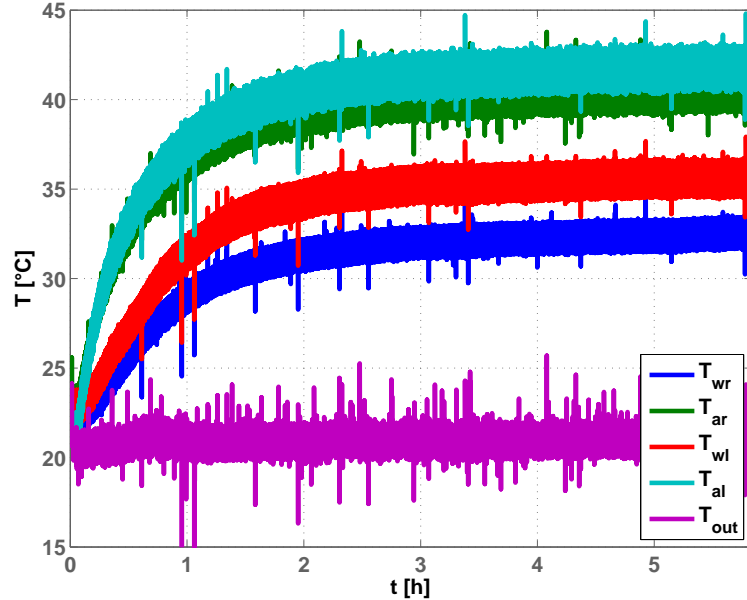
Obrázek 4.5: Statická převodní charakteristika snímače teploty okolí

4.2 Řízení teploty celého domku

Pro návrh PID regulátoru, který bude řídit teplotu uvnitř domku, je třeba nejprve nalézt model tohoto domku. Protože se v kapitole 3 nepodařilo vytvořit stavový model systému vytápěného domku, bude model nalezen pouze v podobě přenosu mezi vstupem a výstupem systému. Tento přenos bude identifikován z naměřené přechodové charakteristiky (odezvy na jednotkový skok při nulových počátečních podmínkách) pomocí metody profesora Strejce (FENCLOVÁ, M.; PECH, Z.; SUKOVÁ, M., 1993).

4.2.1 Identifikace modelu celého domku

Pro tuto identifikaci je třeba nejprve změřit přechodovou charakteristiku mezi vstupním napětím na topných tělesech (pro řízení celého domku jsou tato tělesa řízena stejným signálem) a teplotou vzduchu uvnitř domku (pro řízení celého domku je teplota vzduchu určena jako průměr teplot z obou snímačů). Aby mohla být změřena relevantní přechodová charakteristika, musí být systém v ustáleném stavu (pracovním bodě).



Obrázek 4.6: Odezva domku na vstupní skokový signál

Pracovní bod byl v tomto případě dán teplotou vzduchu uvnitř domku $T_a = 22,2^\circ\text{C}$, teplotou v okolí domku $T_{\text{out}} = 21^\circ\text{C}$ a napětím na topných tělesech $u_l = u_r = 0\text{ V}^2$. Na

²Teploty uvnitř a vně domku by měly být v pracovním bodě stejné.

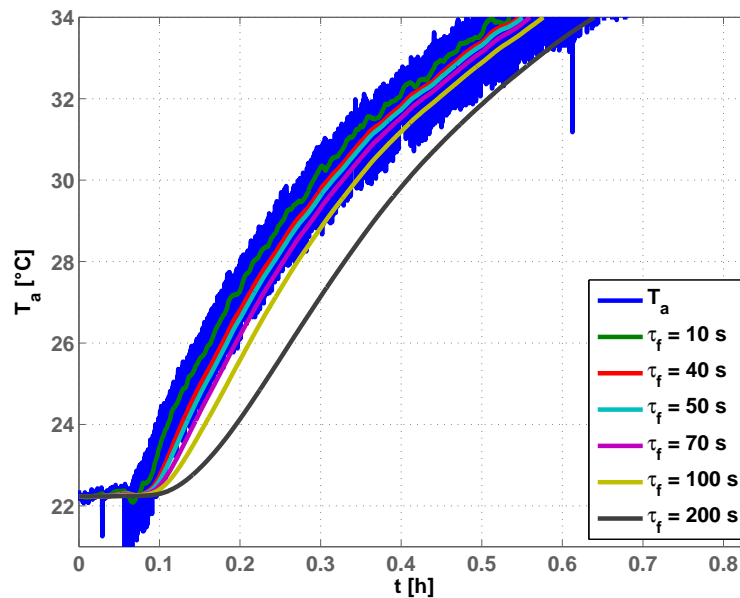
základě poznatků z předchozí kapitoly byl zvolen skok napětí na topných tělesech z 0 V na 4,5 V, což mělo natopit domek na teplotu přibližně 42,5°C. Klimatizace při tomto i následných měřeních nebyla zapnuta a její vliv byl zanedbán. Odezvy všech měřených teplot na tento napěťový skok jsou znázorněny na obr. 4.6.

4.2.1.1 Filtrace signálů ze snímačů teplot

Z obr. 4.6 je patrné, že jsou měřené signály zatíženy velkým šumem, který by znesnadňoval nalezení přenosu systému vytápěného domku. Proto byly v Simulinku vytvořeny filtry s různými časovými konstantami, pomocí kterých byla naměřená data vyhlazena. Filtry byly druhého řádu s přenosem

$$\frac{1}{(\tau s + 1)^2},$$

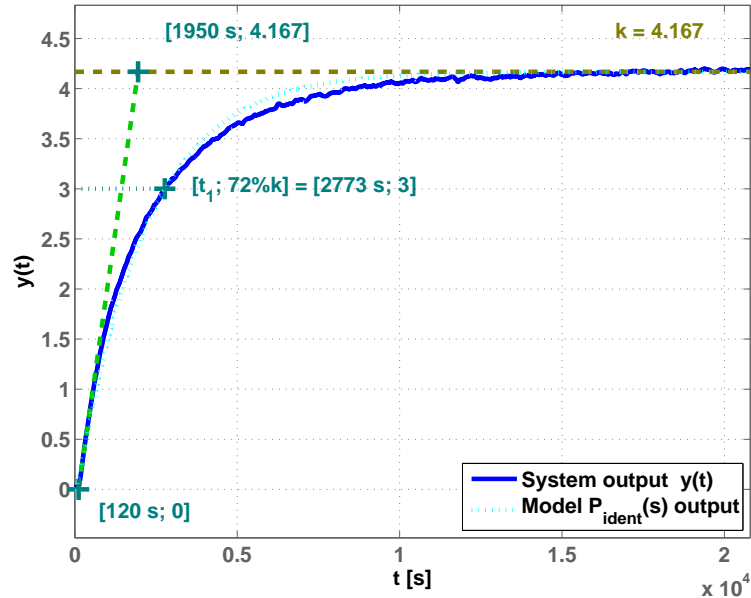
kde τ [s] je časová konstanta filtru (převrácená hodnota zlomové frekvence filtru). Hodnota τ byla zjištěna experimentálně, viz obr. 4.7. Čím větší bylo τ , tím více byla data filtrována, ale zároveň více zpožděna. Proto bylo třeba najít takové τ , které zajistí dobrou filtraci dat a zároveň jejich přijatelné zpoždění. Tyto experimenty byly provedeny pomocí souboru `HeatingHouse_Ta_control\StepResponseFilter.mdl` a časová konstanta filtru byla zvolena $\tau = 40$ s.



Obrázek 4.7: Porovnání filtrovaných signálů – vliv časové konstanty filtru

4.2.1.2 Identifikace přenosu celého domku

K vlastnímu nalezení přenosu mezi vstupním napětím na topných tělesech a teplotou vzduchu uvnitř domku byl použit aritmetický průměr filtrovaných dat ze snímačů teplot T_{al} a T_{ar} . Protože přechodová charakteristika je odezva lineárního systému na jednotkový skok při nulových počátečních podmínkách, bylo třeba nejprve tato naměřená data upravit. Od naměřených dat byla nejprve odečtena počáteční teplota $T_a(0) = 23,6^\circ\text{C}$ a poté byla data vydělena vstupním skokem 4,5 V. Takto upravená data byla připravena pro skript `IdentTF_bySTREJC`, který byl vytvořen pro tyto účely pro absolventskou práci Tomáše Brynycha (BRYNYCH, T., 2017). Tento skript posloužil k nalezení přenosu z přechodové charakteristiky metodou profesora Strejce, viz následující obrázek.



Obrázek 4.8: Identifikace přenosu domku z přechodové charakteristiky

Na obr. 4.8 je modře znázorněna přechodová charakteristika systému a světle modře přechodová charakteristika nalezeného modelu

$$P(s) = \frac{4,167}{167094s^2 + 2207s + 1} \quad (4.1)$$

Tento přenos byl nalezen pomocí příkazu

```
IdentTF_bySTREJC(tt_step2(:,1),tt_step2(:,2),2,0,[120 1830 2773],4.167),
```

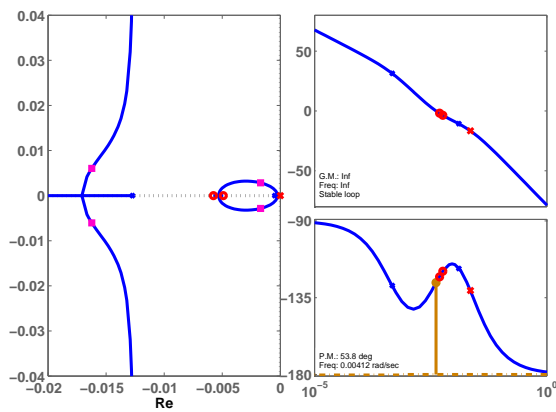
který byl použit ve skriptu `HeatingHouse_Ta_control\StepResponseFilter_figure.m`.

Jak je vidět na obr. 4.8, nalezený model domku není dokonalou aproximací naměřených dat. To může být dáno např. ne zcela konstantní teplotou v laboratoři, protože se během sedmi hodinového měření teplota T_{out} pomalu zvyšovala. Tento vliv bohužel nejde dost dobře eliminovat.

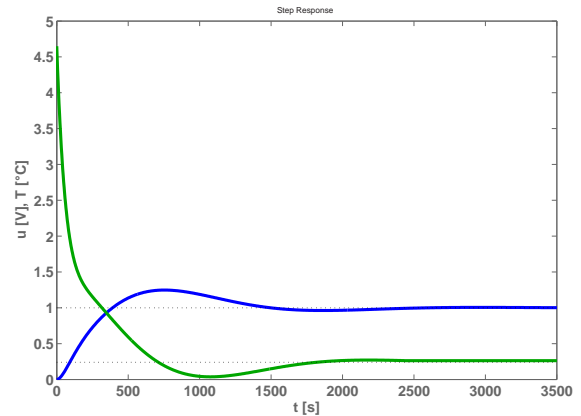
4.2.2 Návrh PID regulátoru pro celý domek

PID regulátor pro řízení teploty celého domku byl navržen metodou geometrického místa kořenů (ROUBAL, J. et al., 2011, kapitola 16). Součástí programu MATLAB/Simulink je grafické prostředí `sisotool`, s jehož pomocí lze tuto metodu poměrně snadno a jednoduše realizovat. Do tohoto prostředí se nejprve načte přenos (4.1) a dále se zapne zobrazení akčního zásahu (napětí na topných tělesech) a regulované veličiny (teplota uvnitř domku), viz následující obrázek.

Pro řízení teploty byly stanoveny tyto požadavky: rychlejší odezvy teploty uvnitř domku s maximálním překmitem 25 % a maximálním napětím na topných tělesech 11,5 V. V prostředí `sisotool` se zobrazují přechodové charakteristiky, tj. odezvy na skok žádané hodnoty regulované veličiny o 1°C. Na to je třeba dbát při kontrole maximálního akčního zásahu.



(a) GMK regulační smyčky



(b) přechodové charakteristiky regulační smyčky

Obrázek 4.9: Návrh regulátoru v prostředí `sisotool`

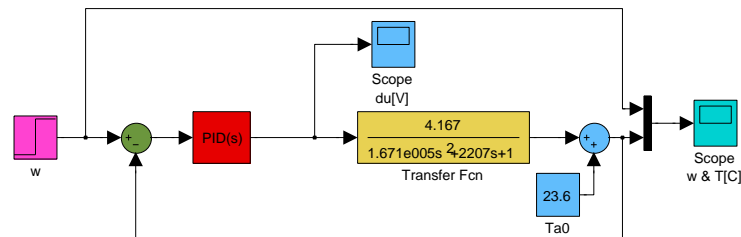
V prostředí `sisotool` lze v okně s geometrickým místem kořenů přidávat nuly a póly regulátoru a měnit jeho zesílení. Pro návrh PID regulátoru se podle (ROUBAL, J., 2012) přidávají dvě nuly a dva póly v pořadí pól, nula, nula a poslední pól do počátku sou-

řadnicového systému. Posouváním prvního pólu (červený křížek), dvou nul (červená kolečka) a pólů uzavřené regulační smyčky (fialové čtverečky) lze tvarovat odezvu regulační smyčky, viz obr. 4.9(b). Tímto způsobem byl navržen regulátor s přenosem

$$C(s) = 0,0058093 \frac{340000s^2 + 1900s + 1}{44s^2 + s}. \quad (4.2)$$

V simulinku je ale PID regulátor realizován v jiné konfiguraci, proto byly konstanty z tohoto přenosu získány pomocí skriptu `tf2PID`. Nalezené konstanty PID regulátoru jsou $k_P = 1,4569$, $k_I = 0,0042$, $k_D = 93,4345$, $\omega_f = 0,0226$ rad/s.

Shodnost odezvy regulační smyčky s výše uvedenými konstantami PID regulátoru byla nejprve odzkoušena s přenosem (4.1), viz následující obrázek. Protože linearizovaný model (4.1) aproximuje systém v okolí pracovního bodu, byla na jeho výstupu přičtena počáteční teplota $23,6^\circ\text{C}$.

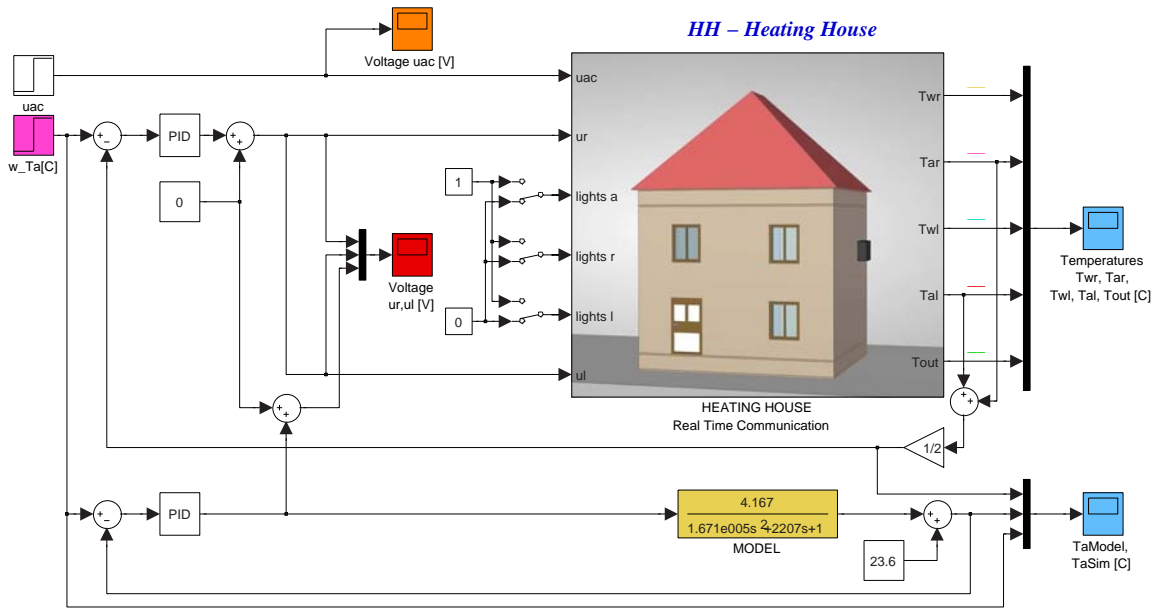


Obrázek 4.10: Regulační obvod modelu domku s PID regulátorem

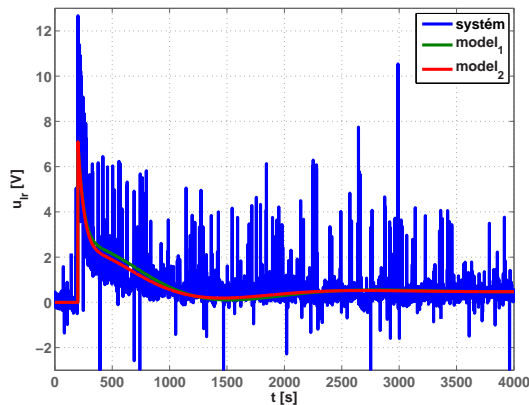
Protože odezva regulačního obvodu z obr. 4.10 byla správná, bylo přistoupeno k řízení laboratorního domku. Pro korektní ověření správnosti identifikace a návrhu regulátoru byly pomocí souboru v `HeatingHouse_Ta_control\HH_rt_PIDcontrol.mdl` porovnány odezvy laboratorního domku a nalezeného přenosu (4.1) v uzavřené regulační smyčce.

První regulace domku byla provedena na schématu z obr. 4.11 s počáteční teplotou nižší než byla počáteční teplota při měření přechodové charakteristiky, viz obr. 4.6. Změna žádané hodnoty regulované veličiny byla nastavena o $+1^\circ\text{C}$, čímž došlo k naregulování teploty vzduchu uvnitř domku na $23,4^\circ\text{C}$, tj. teplota domku se ustálila v pracovním bodě, ve kterém byl identifikován přenos (4.1). Na tomto měření se ukázalo, že regulátor funguje relativně dobře.

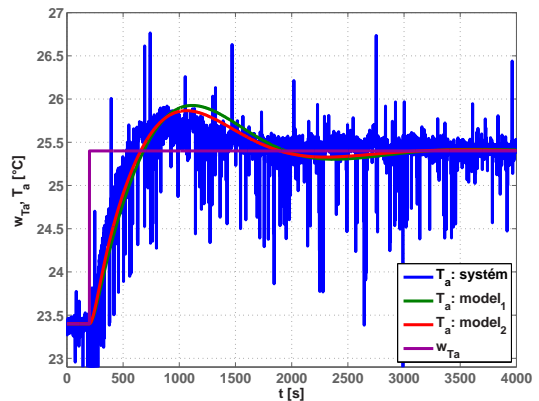
Poté byla nastavena změna žádané hodnoty regulované veličiny o $+2^\circ\text{C}$. Zde je nutné počítat s dvojnásobným akčním zásahem (změna žádané hodnoty regulované veličiny o $+2^\circ\text{C}$). U této regulace už teplota uvnitř domku nestoupala a ustálila se na požadované teplotě $25,4^\circ\text{C}$. Časové odezvy regulační smyčky lze pozorovat na následujících obrázcích.



Obrázek 4.11: Regulační obvod systému domku s PID regulátorem



(a) akční zásah

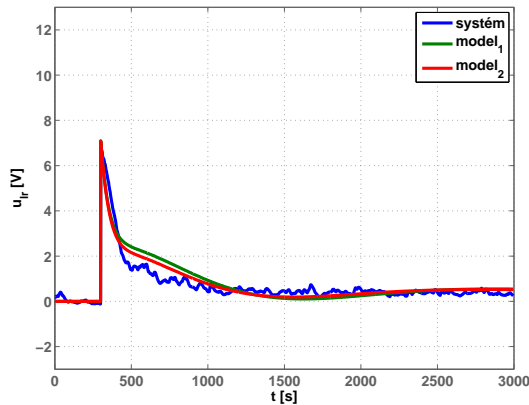


(b) žádaná a regulovaná veličina

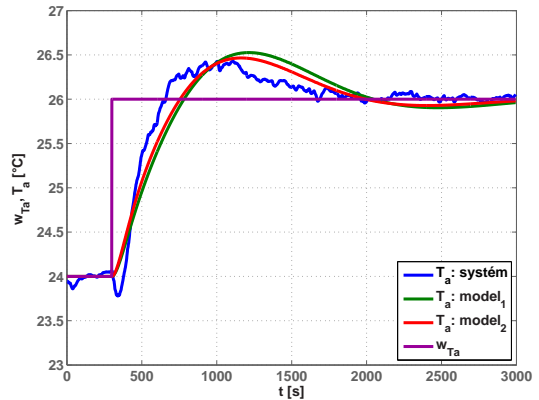
Obrázek 4.12: Odezvy domku a jeho modelů na skok žádané hodnoty regulované veličiny

Regulační odezva s modelem (4.1) je na obr. 4.12 označena jako `model1` a je znázorněna tmavě zelenou barvou. Po této regulaci byl upravován nalezený model domku pomocí experimentálních změn parametrů T_u , T_n a T_i Strejcovy identifikační metody. Cílem bylo upravit model (přenos) tak, aby se jeho odezva v uzavřené regulační smyčce více podobala reálně naměřeným datům. Odezvy tohoto modelu jsou označeny jako `model2` (červený průběh). Rozdíl mezi odezvou obou těchto modelů je téměř zanedbatelný – obrázek 4.12 tedy potvrzuje správnost identifikace domku.

Protože je na obr. 4.12 patrný velký vliv šumu měření, následovala regulace se zapnutými filtry měřených teplot. Časové odezvy regulační smyčky se zapnutými filtry lze pozorovat na obr. 4.13. Oproti předchozímu měření bez filtrované teploty uvnitř domku lze pozorovat mnohem hladší průběh regulované veličiny a potažmo také mnohem hladší průběh akčního zásahu.



(a) akční zásah



(b) žádaná a regulovaná veličina

Obrázek 4.13: Odezvy domku a jeho modelů na skok žádané hodnoty regulované veličiny při použití filtrace měřených veličin

Z obr. 4.12 a obr. 4.13, které porovnávají odezvy laboratorního domku s odezvami identifikovaného přenosu domku (4.1), je patrné, že jak identifikace, tak následný návrh PID regulátoru byly provedeny správně. Odezvy regulačních obvodů se shodují.

Na obr. 4.12(b) i na obr. 4.13(b) je patrný propad regulované veličiny bezprostředně po změně žádané hodnoty regulované veličiny. To je způsobeno navrženou elektronikou, která zprostředkovává komunikaci laboratorního domku s počítačem, což bude podrobně diskutováno v závěru této práce.

Kapitola 5

Identifikace a návrh PID regulátoru pro levou a pravou místnost

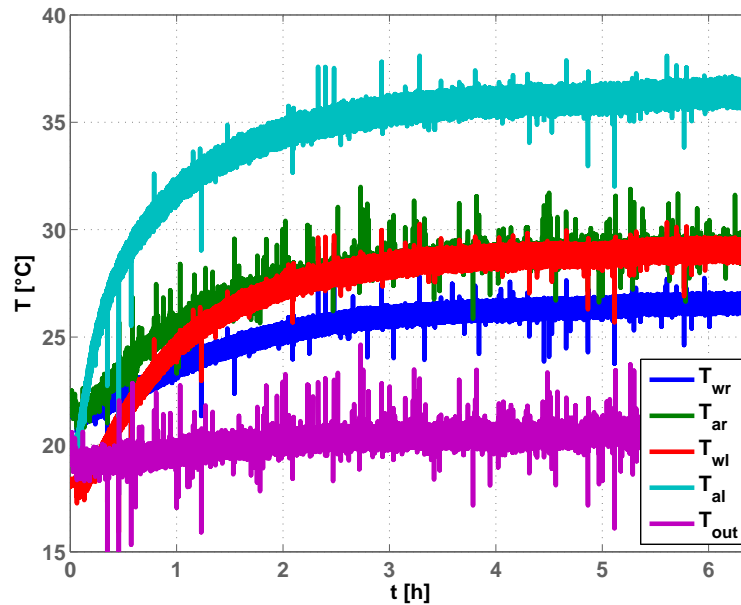
Postup identifikace a návrhu PID regulátoru pro obě místnosti je shodný s postupem z předchozí kapitoly. Následuje stručné shrnutí. Nejdříve se naměří přechodová charakteristika dané místnosti, na jejímž základě se provede identifikace metodou profesora Strejce. Takto je získán přenos dané místnosti, který se nahraje do prostředí `sisotool`, kde se navrhne regulátor. Tímto návrhem se získá přenos regulátoru, z něž se dostanou konstanty PID regulátoru. Správnost návrhu se nejdříve ověří na získaném lineárním modelu dané místnosti, následně pak na laboratorním domku v uzavřené regulační smyčce. K této regulační smyčce domku je současně paralelně zapojena regulační smyčka modelu místnosti, který aproximuje místnost domku. Tímto se získají odezvy modelu a systému na změnu žádané hodnoty regulované veličiny bez filtrace. Nakonec se ověří správnost návrhu modelu a regulátoru se zapnutým filtrováním žádané regulované veličiny.

Rozdělení domku na dvě místnosti bylo provedeno již vyrobenou přepážkou. Ta rozděluje domek napůl a odděluje tak levou a pravou místnost. Je vyrobena z překližky, její tloušťka je 10 mm. Obě místnosti mají své vlastní topné těleso a je tedy možné natápět každou místnost zvlášť. Ke každé místnosti patří příslušný senzor teploty vzduchu jak uvnitř místnosti, tak ve stěně místnosti.

K měření přechodových charakteristik byl použit stejný komunikační soubor z obr. 4.2. Následující měření využívají hotových statických převodních charakteristik snímačů teplot z podkapitoly 4.1. Filtrace byla provedena stejným způsobem jako v kapitole 4, a proto již nebude zmiňováno její provedení. Časová konstanta filtru zůstává stejná a to $\tau = 40$ s.

5.1 PID regulátor pro levou místnost

Jak již bylo zmíněno, levá místnost byla identifikována pomocí přechodové charakteristiky. V komunikačním souboru se odpojil skokový signál vedoucí k pravému topnému tělesu, a tak se vytápěla pouze levá místnost. Velikost skokového signálu byla ponechána stejná, a to 4,5 V.



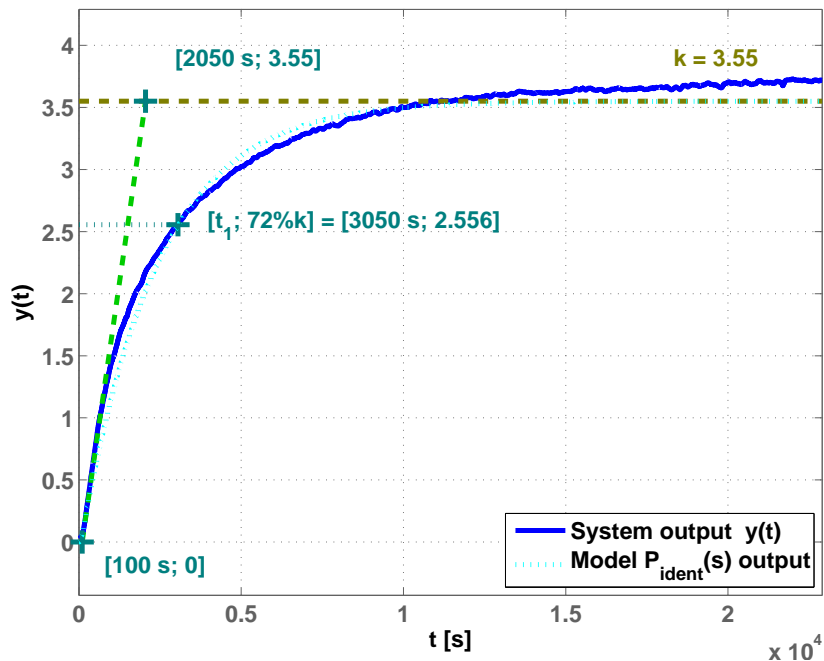
Obrázek 5.1: Přechodová charakteristika levé místnosti

Z předchozího obrázku lze na první pohled vidět, že se přechodová charakteristika pro levou místnost lišila. Zaprvé tím, že už nestoupají obě vnitřní teploty T_{al} a T_{ar} stejně. Teplota T_{al} roste mnohem rychleji a konečná teplota v pravé místnosti je o cca 5°C nižší než v případě natápění stejným napětím obou těles. To je způsobeno polovičním dodávaným výkonem, kvůli zapnutí topného tělesa jen v levé místnosti. Na druhou stranu se natápí jen poloviční objem vzduchu. Teplota v pravé místnosti tak logicky roste pomaleji a do nižší konečné teploty. Okolní teplota se bohužel v průběhu měření přechodové charakteristiky zvýšila z $19,4^{\circ}\text{C}$ na $20,9^{\circ}\text{C}$. To mohlo zhoršit identifikaci z této charakteristiky. Tento vliv nemohl být zcela eliminován.

Také lze pozorovat, že naměřená data vykazovala méně šumu oproti předchozí přechodové charakteristice, kdy bylo přivedeno napětí na obě topná tělesa. Tento jev byl nejspíše způsoben zapojením elektroniky laboratorního domku a je ponechán k diskuzi do závěru práce.

5.1.1 Identifikace modelu levé místnosti

Naměřená data přechodové charakteristiky byla vyfiltrována způsobem jako u celého domku a se stejnou časovou konstantou τ . Poté byla od dat odečtena počáteční teplota a vydělena skokovým signálem, tj. 4,5V. Kvůli stále přítomnému šumu měřené charakteristiky byly parametry časových konstant T_u , T_n a T_i ručně zadány, viz kap. 4.2.1. Takto upravená data byla připravena na identifikaci pomocí skriptu `IdentTFbySTREJC`.



Obrázek 5.2: Identifikace a ručně zadané parametry

U této identifikace byla preferována shoda modelu a systému hlavně v dynamické části charakteristiky. Další růst teploty v přechodové charakteristice mohl být způsoben okolními vlivy. Na obr. 5.2 je znázorněna tmavě modrou barvou přechodová charakteristika levé místnosti a světle modře model levé místnosti, který byl dán přenosem

$$P(s) = \frac{3,55}{155705s^2 + 2428s + 1}. \quad (5.1)$$

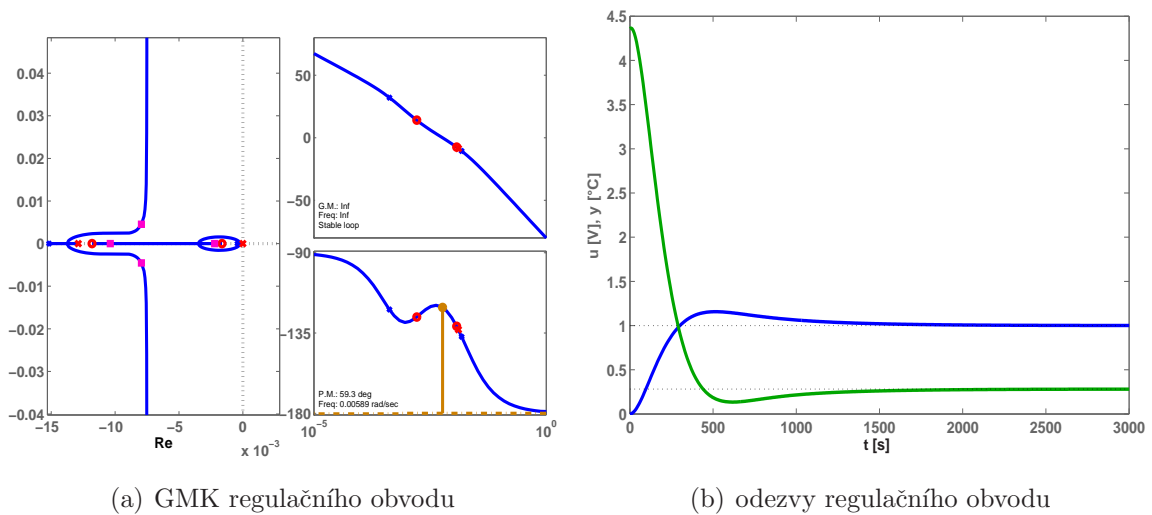
Ten byl nalezen pomocí příkazu

```
IdentTF_bySTREJC(tt_step2(:,1),tt_step2(:,2),2,0,[100 1950 3050],3.55),
```

který byl použit ve skriptu `Tal\StepResponseFilter_figure.m`.

5.1.2 Návrh PID regulátoru pro levou místnost

Návrh PID regulátoru probíhal stejně jako u regulátoru pro obě místnosti v grafickém prostředí sisotool. Zde se stejným způsobem daly na zápornou reálnou poloosu dva křížky a dvě kolečka. Zleva byl křížek, následovala dvě kolečka a poslední křížek byl posunut do počátku (ROUBAL, J., 2012). Takto byl zajištěn PID regulátor v prostředí sisotool. Dále se posouvaly fialové čtverečky, které reprezentovaly zesílení proporcionální složky. Pro tuto místnost byl navržen regulátor s nižším překmitem, konkrétně 15,7% za cenu delšího ustálení teploty.



Obrázek 5.3: Návrh regulátoru v prostředí sisotool

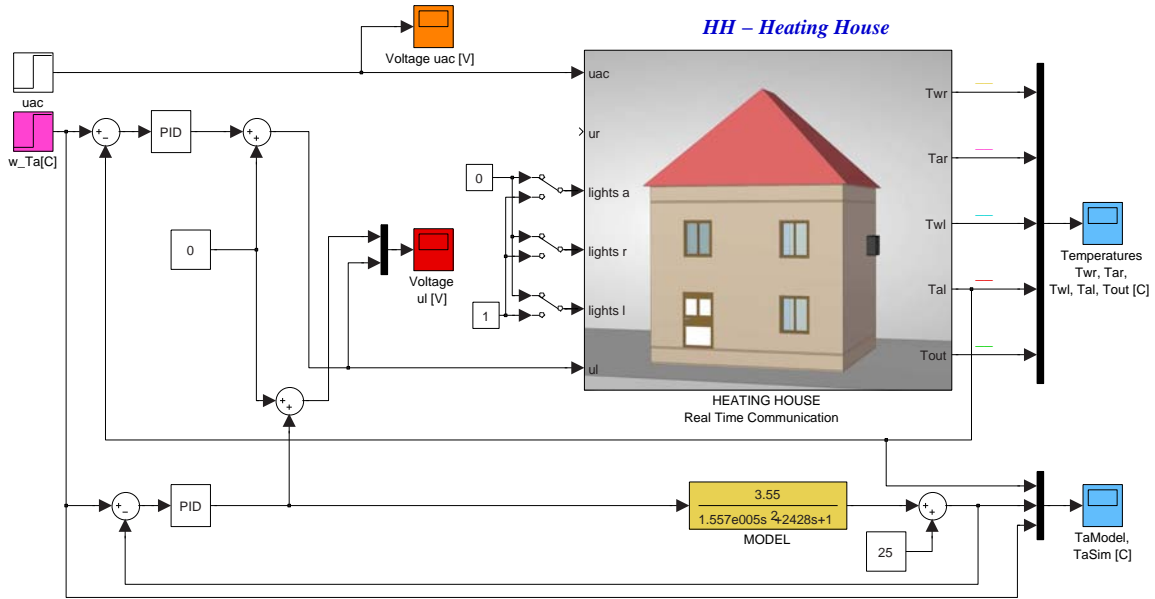
Tímto způsobem byl nalezen regulátor s přenosem

$$C(s) = 0,0065357 \frac{51850s^2 + 695s + 1}{78s^2 + s}. \quad (5.2)$$

Výstupem sisotoolu byl tedy přenos regulátoru a jeho zesílení. Skriptem tf2PID byly nalezeny konstanty PID regulátoru: $k_P = 4,0325$, $k_I = 0,0065$, $k_D = 24,3389$, $\omega_f = 0,0128$ rad/s.

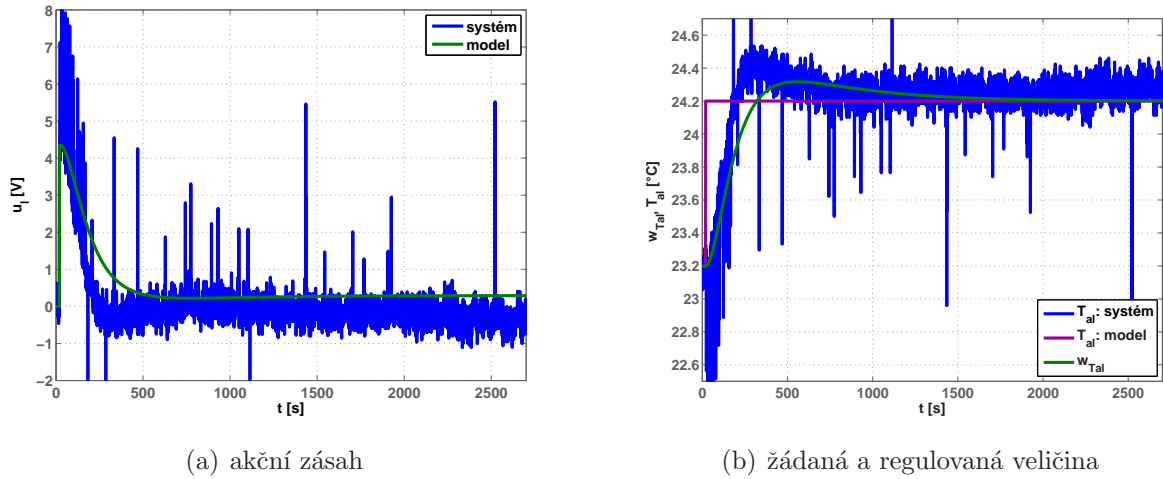
Shodnost odezvy regulační smyčky s výše uvedenými konstantami PID regulátoru byla nejprve odzkoušena s přenosem (5.1) úplně stejně jako u celého domku. Jen se změnil identifikovaný přenos, konstanty regulátoru a počáteční teplota. Odezva regulačního obvodu byla správná a přistoupilo se k řízení laboratorního domku.

U ověření PID regulátoru pro levou místnost se simulinkové schéma upravilo tak, aby se domek a přenos domku porovnaly v uzavřené regulační smyčce, viz následující obrázek.



Obrázek 5.4: Regulační obvod levé místnosti s PID regulátorem

Po zkušenosti z celého domku se první regulace v levé místnosti používala na ustálení teploty T_{al} . Poté se nastavila změna žádané regulované veličiny z $23,2^{\circ}\text{C}$ na $24,2^{\circ}\text{C}$. Odezvy domku a modelu na tuto změnu jsou na následujících obrázcích.

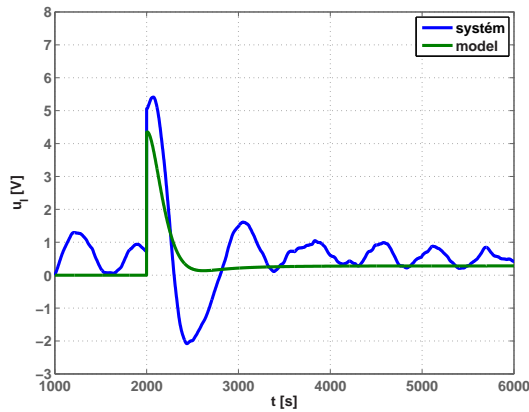


(a) akční zásah

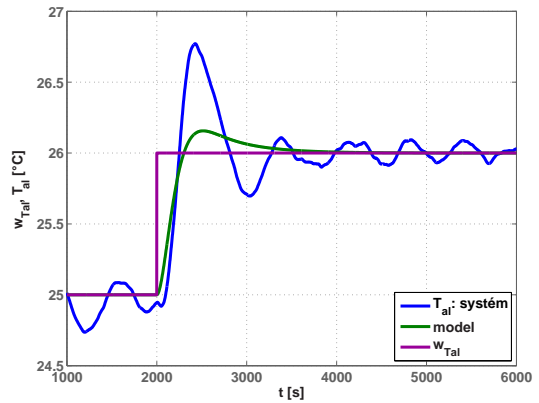
(b) žádaná a regulovaná veličina

Obrázek 5.5: Odezvy domku a jeho modelu na skok žádané hodnoty regulované veličiny v levé místnosti

Modrý průběh znázorňuje skutečnou nefiltrovanou teplotu uvnitř levé místnosti, zelený průběh je změna žádané hodnoty regulované veličiny a červená barva představuje nalezený model.



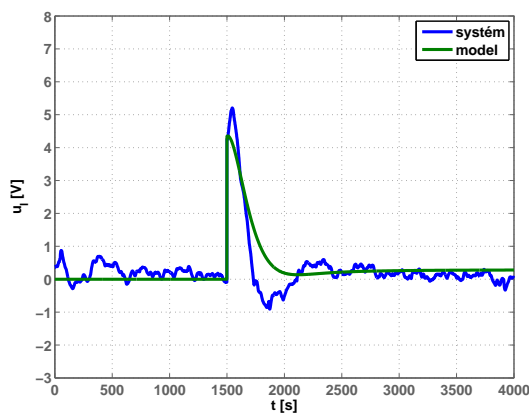
(a) akční zásah



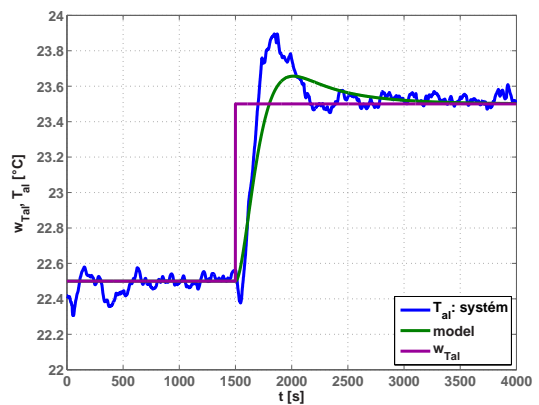
(b) žádaná a regulovaná veličina

Obrázek 5.6: Odezvy domku a jeho modelu na skok žádané hodnoty regulované veličiny v levé místnosti

Následovalo měření, kde se při řízení teploty uvnitř domku použilo filtrování teploty uvnitř levé místnosti. Z obr. 5.6 je patrné, že filtrování s časovou konstantou $\tau = 40$ s způsobilo nežádoucí kmitání teploty uvnitř místnosti. Čekalo se 2000 s na ustálení teploty před skokovým signálem, což je zhruba doba jedné regulace bez filtrace. Regulace s $\tau = 10$ s je na následujících obrázcích. Z těch je patrné, že se zlepšila shoda modelu se systémem. Zde se čekalo na ustálení teploty 1500 s. Překmit regulované veličiny už více odpovídal překmitu systému bez filtru.



(a) akční zásah

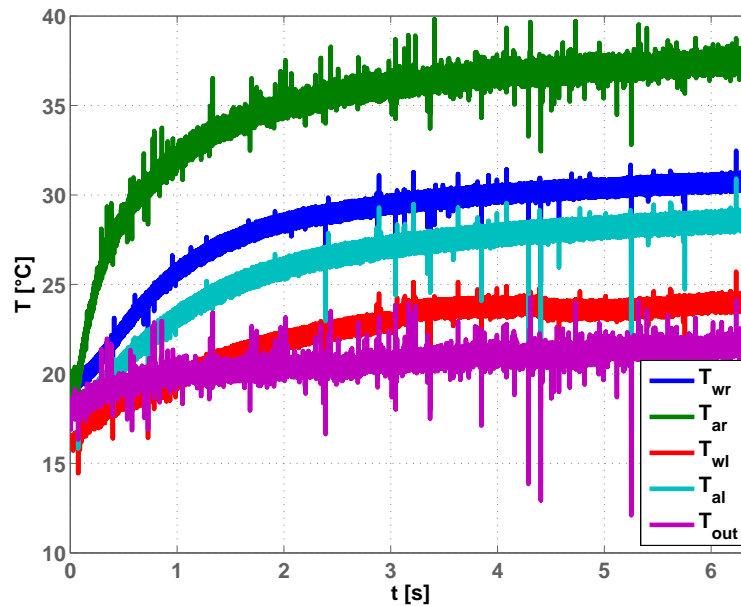


(b) žádaná a regulovaná veličina

Obrázek 5.7: Odezvy domku a jeho modelu na skok žádané hodnoty regulované veličiny v levé místnosti

5.2 PID regulátor pro pravou místnost

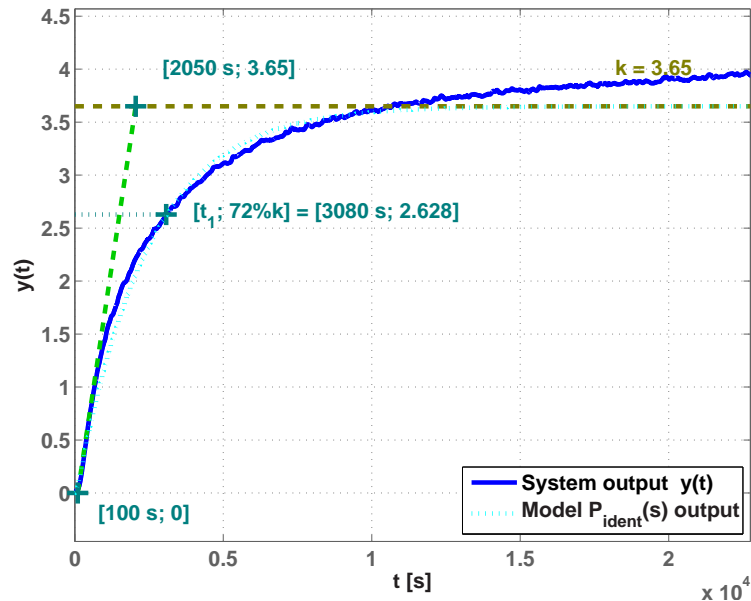
PID regulátor pro pravou místnost je s drobnými změnami totožný jako u regulace pro levou místnost, a proto bude tato podkapitola o něco stručnější. Logicky muselo být při měření přechodové charakteristiky pro tuto místnost vypnuto topení v levé místnosti. Toho bylo dosaženo odpojením skokového signálu od vstupu domku u_1 . Velikost skoku byla pro lepší porovnání ponechána stejně, tj. 4,5 V.



Obrázek 5.8: Přechodová charakteristika pravé místnosti

Na předchozím obrázku lze pozorovat téměř stejnou charakteristiku jako u levé místnosti, jen se zvyšovala teplota uvnitř pravé místnosti. Okolní teplota T_{out} vzrostla od začátku měření přechodové charakteristiky z 18,5°C na 21,8°C. Okolní teplota se tedy změnila o 3,3°C v průběhu měření. To už je poměrně velký rozdíl počáteční a konečné okolní teploty oproti přechodové charakteristice levé místnosti. Tam byla změna okolní teploty jen o 1,5°C. Na druhou stranu oproti přechodové charakteristice v levé místnosti nebyl ke konci zaznamenán prudší nárůst okolní teploty, a tak byla přechodová charakteristika relevantní v celém svém průběhu.

Následovalo vyfiltrování dat, pro které byla použita stále stejná časová konstanta $\tau = 40$ s. Poté se data vydělila vstupním skokovým signálem 4,5 V. Takto upravená charakteristika byla připravena pro identifikaci pomocí skriptu `IdentTFbySTREJC`.



Obrázek 5.9: Identifikace a ručně zadané parametry

Skript dokáže automaticky najít přenos systému. Jenže charakteristika byla pro tuto možnost příliš zatížena šumem i po filtraci, a tak bylo nutné experimentální ruční zadávání časových konstant T_u , T_n a T_i . Podobně jako u identifikace levé místnosti byla upřednostněna shoda naměřené dynamické části přechodové charakteristiky s modelem pravé místnosti.

Naměřená charakteristika (na přechodím obrázku tmavě modrá) vypadá tedy tak, že má vyšší zesílení než tomu bylo v případě levé místnosti. To může být dáno již zmíněnou rostoucí okolní teplotou v průběhu měření. Vyšší zesílení mohlo také ovlivnit to, že pravá místnost má z přední stěny místo okna dveře obr. 3.7, které mají jiné tepelné vlastnosti a mohly způsobit menší tepelný tok unikající z této místnosti. Proto ke konci identifikace lze pozorovat, že teplota naměřené charakteristiky oproti navrženému modelu roste. Přitom by se správně měla ustálit na stejné hodnotě jako model této místnosti.

Takto byl nalezen přenos

$$P(s) = \frac{3,65}{158783s^2 + 2451s + 1} \quad (5.3)$$

Tento přenos byl nalezen pomocí příkazu

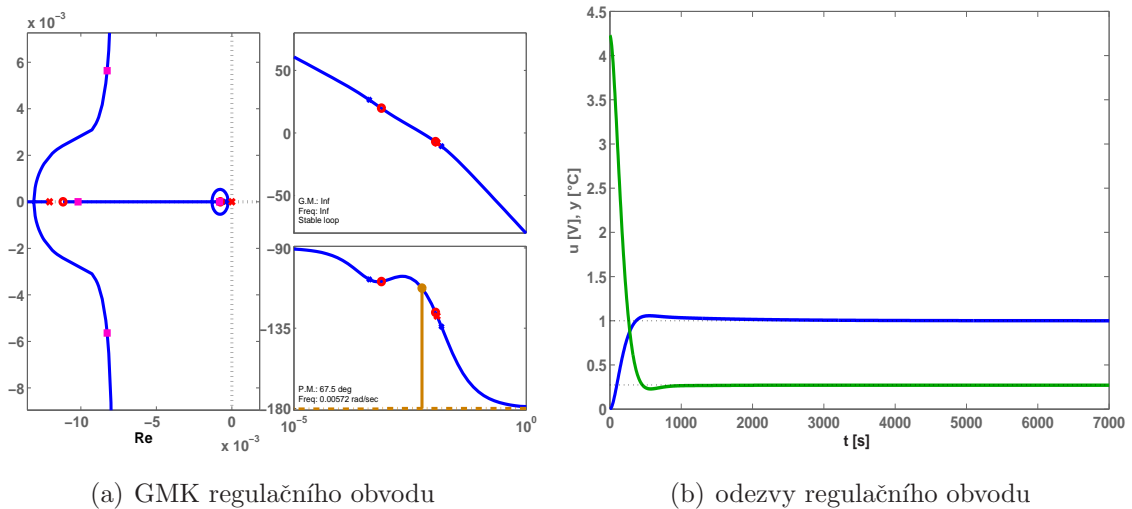
```
IdentTF_bySTREJC(tt_step2(:,1),tt_step2(:,2),2,0,[100 1950 3080],3.65),
```

který byl použit ve skriptu `Tar\StepResponseFilter_figure.m`.

5.2.1 Návrh PID regulátoru pro pravou místnost

Návrh PID regulátoru probíhal stejně jako u regulátoru pro levou místnost, tj. v grafickém prostředí `sisotool`. Zde se postupovalo znovu podle (ROUBAL, J., 2012), kdy se na zápornou reálnou poloosu daly dva křížky a dvě kolečka. Zleva byl křížek, dvě kolečka a poslední křížek byl umístěn do počátku.

Takto byl zajištěn PID regulátor v prostředí `sisotool`. Dále se posouvaly fialové čtveřky, které reprezentovaly zesílení proporcionální složky. Pro tuto místnost byl navržen regulátor s ještě nižším překmitem než u levé místnosti konkrétně, 5.7%, za cenu delšího ustálení teploty. Teplota se ale dlouho před úplným ustálením pohybovala velmi blízko ustálenému stavu, a proto byl tento návrh regulátoru považován za zatím nejlepší. Akční zásah přitom zůstal téměř stejný, a to přibližně 4,25 V. Při takovém akční zásahu je možné zvýšit jednou regulací teplotu o cca 2,5°C.

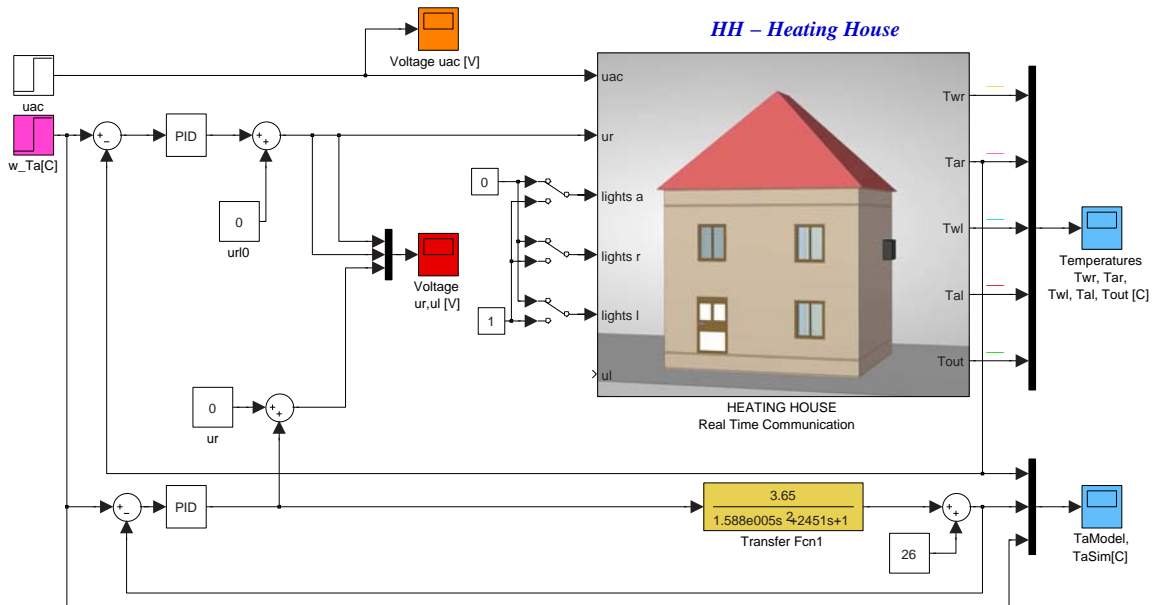


Obrázek 5.10: Návrh regulátoru v prostředí `sisotool`

Takto byl nalezen regulátor s přenosem

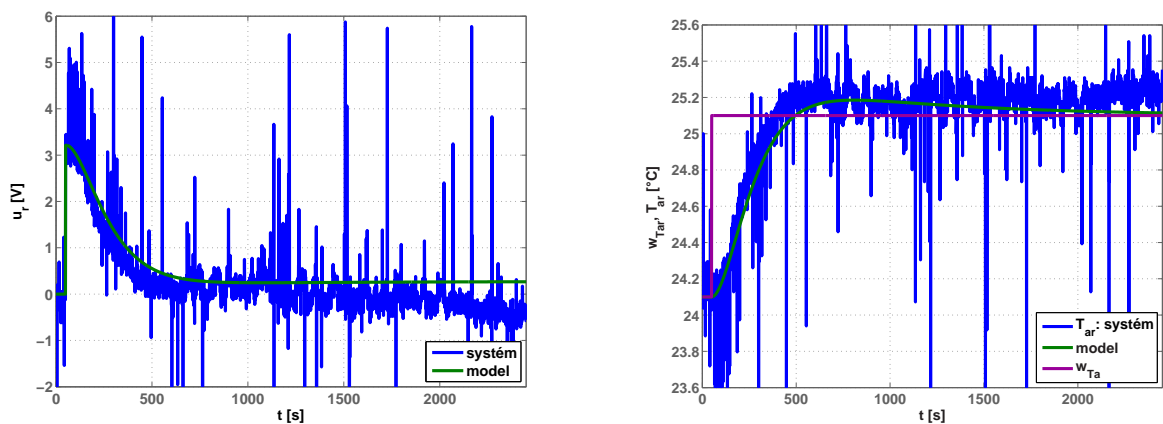
$$C(s) = 0,0065357 \frac{51850s^2 + 695s + 1}{78s^2 + s}. \quad (5.4)$$

Výstupem prostředí `sisotool` byl přenos regulátoru a jeho zesílení. Skriptem `tf2PID` byly nalezeny následující konstanty pro PID regulátor: $k_P = 3,0141$, $k_I = 0,0030$, $k_D = 16,4845$, $\omega_f = 0,0120$ rad/s.



Obrázek 5.11: Regulační obvod pravé místnosti s PID regulátorem

Nejdříve byla ustálena teplota uvnitř pravé místnosti regulací na $24,1^{\circ}\text{C}$. Poté byla nastavena změna žádané hodnoty regulované veličiny o $+1^{\circ}\text{C}$. Tímto způsobem při regulaci už teplota uvnitř domku nestoupala ke konci měření a ustálila se na požadované teplotě $25,1^{\circ}\text{C}$ tak, jak měla. Časové odezvy regulační smyčky lze pozorovat na následujících obrázcích.

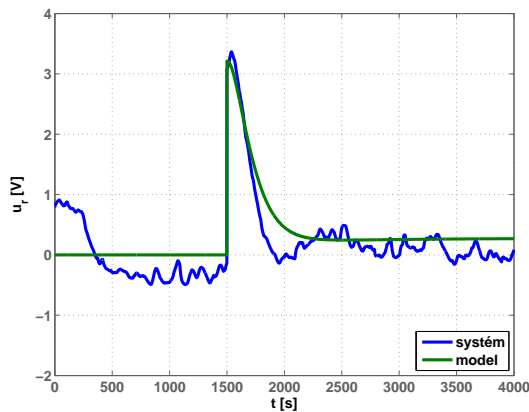


(a) odezva akčního zásahu

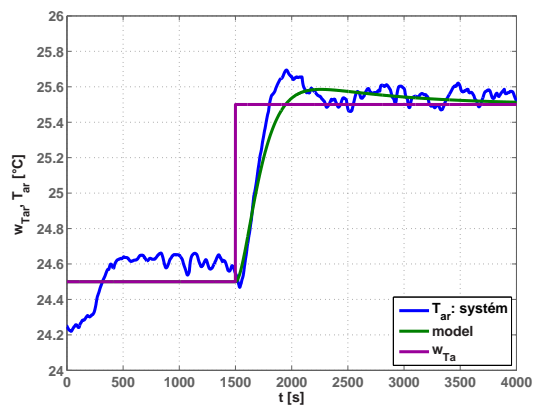
(b) odezva filtrované žádané veličiny

Obrázek 5.12: Odezvy domku a jeho modelu na skokový signál žádané hodnoty regulované veličiny v pravé místnosti

Následně bylo provedena regulace teploty uvnitř místnosti se zapnutými filtry měřené teploty uvnitř pravé místnosti. Pro lepší porovnání těchto odezev byly vybrány podobné počáteční i konečné teploty. Pro první regulaci s filtrem byla vybrána časová konstanta $\tau = 20$ s, protože u levé místnosti bylo odpozorováno, že by mělo být τ nižší. Doba ustálení teploty uvnitř pravé místnosti i délka měření byly taktéž ponechány shodné. Časové odezvy regulační smyčky se zapnutým filtrem $\tau = 20$ s jsou na obr. 5.13. Následovalo měření s menším τ , konkrétně $\tau = 10$ s. To bylo provedeno hned po předchozím měření a jeho odezvy jsou na obr. 5.14.

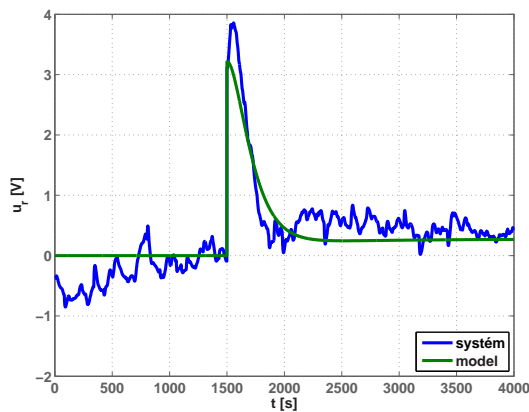


(a) akční zásah

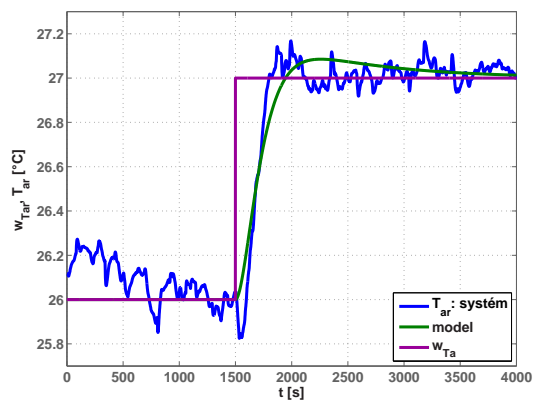


(b) žádaná a regulovaná veličina

Obrázek 5.13: Odezvy domku a jeho modelu na skokový signál žádané hodnoty regulované veličiny v pravé místnosti



(a) akční zásah



(b) žádaná a regulovaná veličina

Obrázek 5.14: Odezvy domku a jeho modelu na skokový signál žádané hodnoty regulované veličiny v pravé místnosti

Odezvy z těchto obrázků vypadají velmi podobně jako u levé místnosti. Na ustálení teploty uvnitř pravé místnosti se čekalo 1500 s. Ve chvíli skokového signálu byla o něco málo vyšší než požadovaná teplota. To však nesnižovalo relevanci měření. Těsně po změně žádané hodnoty regulované veličiny nastal propad teploty uvnitř pravé místnosti podobně jako u levé místnosti. Toto snížení teploty není reálnou reprezentací změny teploty, ale je spíše způsobeno elektronikou řídící tento domek.

Ve srovnání s vyšší filtrací bylo dosaženo věrohodnějších odezev bez výraznějšího překmitu. Dá se říci, že pro měření s filtrovanou teplotou je lepší zvolit časovou konstantu maximálně $\tau = 10$ s. Kromě toho jsou průběhy pravé místnosti a modelu pravé místnosti téměř shodné, a lze tak považovat návrh regulátoru za úspěšný.

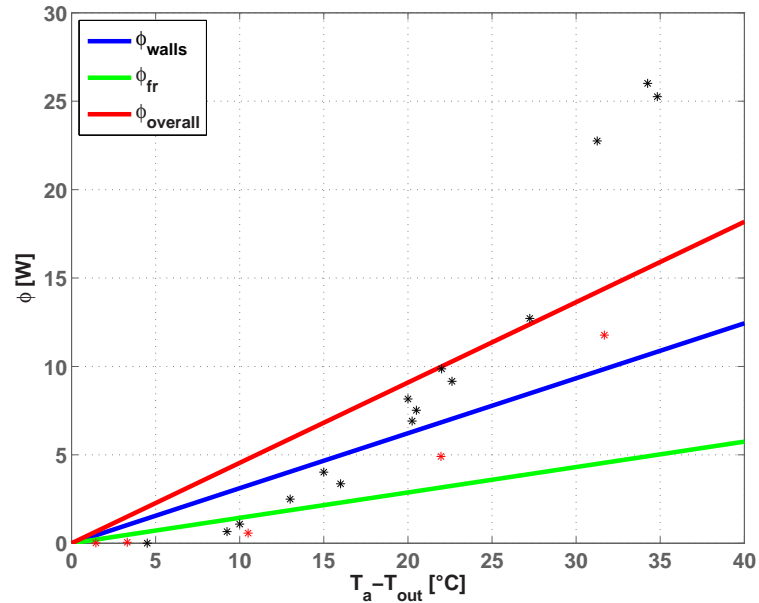
Kapitola 6

Závěr

Ve vytvořené absolventské práci se podařilo splnit body zadání v následujícím rozsahu. Nejprve byla stručně popsána konstrukce a parametry modelu laboratorního domku, který vznikl na Vyšší odborné škole v Sezimově Ústí v rámci absolventské práce (RABIŇÁK, P., 2014). Pro účely této práce byla v Akreditované kalibrační laboratoři v Jaderné elektrárně Temelín provedena kalibrace teploměrů, které jsou umístěny uvnitř laboratorního domku. Kalibrace potvrdila lineárnost a dobrou kvalitu teploměrů v celém jejich měřícím rozsahu, viz obr. 2.5 a obr. 2.6.

Na základě matematicko-fyzikálního popisu, který vychází z teorie prostupu tepla stěnou byl hledán stavový model laboratorního domku. Při tvorbě modelu bylo měřením zjištěno, že závislost tepelného toku na teplotním spádu uvnitř a vně domku není lineární, viz obr. 3.13, což neodpovídá studované teorii. Tuto nelinearitu mohly způsobovat ventilátory na klimatizačních jednotkách (Peltierovy články s ventilátory) laboratorního domku, které uvnitř domku rozvyřují vzduch. Ty jsou trvale v chodu i v případě, že jsou Peltierovy články vypnuty (RABIŇÁK, P., 2014). Tato hypotéza byla ověřena změřením závislosti tepelného toku na teplotním spádu s hardwarově odpojenými ventilátory. Změřená závislost lze pozorovat na obr. 6.1, kde jsou měření s odpojenými ventilátory znázorněna červenými hvězdičkami. Jak je z tohoto obrázku patrné, výše zmíněná hypotéza se nepotvrdila. Důvod nelinearity tak zůstal nezodpovězen. Tvorba stavového modelu laboratorního domku se tedy ukázala nad rámec možností autora této práce a stavový model domku nakonec vytvořen nebyl.

Z důvodu popsaném v předchozím odstavci byla identifikace celého domku provedena pouze z přechodové charakteristiky pomocí metody profesora Strejce. Tak byl nalezen model (4.1), na jehož základě byl metodou geometrického místa kořenů navržen regulátor (4.2). Regulátor byl nejdříve odzkoušen s nalezeným modelem (4.1), viz obr. 4.10.

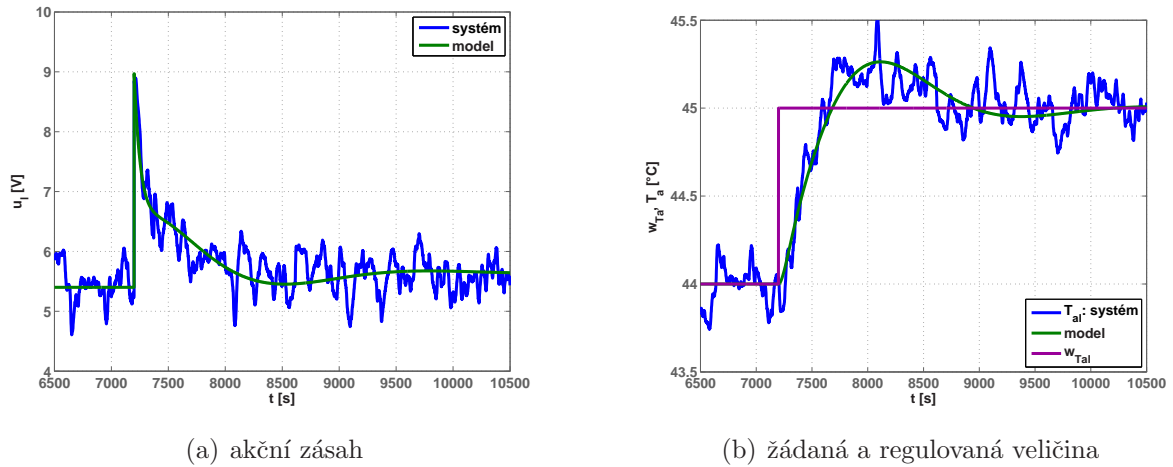


Obrázek 6.1: Závislost celkového tepelného toku na teplotním spádu

Odezva regulačního obvodu byla správná a tak se přistoupilo k řízení laboratorního domku. Shodnost odezev regulačních smyček laboratorního domku s jeho modelem (schéma viz obr. 4.11) potvrdily správnost identifikace domku i správnost návrhu regulátoru, viz obr. 4.12. Tyto experimenty byly provedeny při malém teplotním spádu a to i s filtrací měřené veličiny, viz obr. 4.13.

V kapitole 5 následoval totožný postup u obou místností zvláště, tedy identifikace z přechodové charakteristiky, nalezení modelu (přenosu), návrh regulátoru a jeho ověření a následná aplikace na laboratorním domku. Jak ukazují výsledky z této kapitoly, konkrétně pro levou místnost obrázky 5.5 a 5.7, respektive pro pravou místnost obrázky 5.12 a 5.14, i zde bylo dosaženo velmi kvalitních výsledků.

Výše zmíněné regulace byly provedeny pro malé teplotní spády mezi teplotou uvnitř a vně domku. Proto ještě následovalo odzkoušení regulátoru při vyšším teplotním spádu, k čemuž se použil komunikační soubor z obr. 4.11. Zde byla nastavena změna žádané hodnoty regulované veličiny ze 44°C na 45°C (kvůli vyššímu teplotnímu spádu bylo nutné delší ustalování regulované veličiny před skokem žádané hodnoty). Protože byly měřené teploty zatíženy velkým šumem, byly tyto signály vyhlazovány pomocí filtrů s časovou konstantou $\tau = 10$ s. Časové odezvy regulační smyčky lze pozorovat na obr. 6.2. Z nich je patrné, že se odezvy regulačních obvodů (teoretického a reálného) shodují i při vyšším teplotním spádu, což značí, že je laboratorní model vytápěného domku lineární.

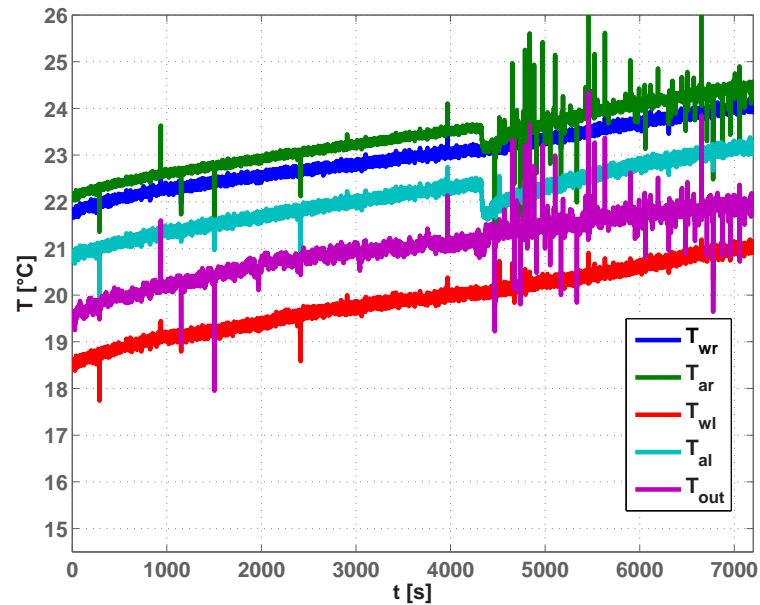


Obrázek 6.2: Regulace celého domku při vyšším teplotním spádu

V rámci této absolventské práce byly zaznamenány aspekty, které komplikovaly některá měření. Prvním problémem bylo správně změřit přechodovou charakteristiku, která byla potřebná pro identifikaci přenosu. Přechodová charakteristika se musí měřit z nulových počátečních podmínek. To v praxi znamená z ustáleného stavu, tj. ze stavu, kdy jsou teploty uvnitř a vně domku stejné a zároveň se teplota vně domku po celou dobu měření nemění. Za nejpříjemnější ustálený stav se považovalo buď, když se do laboratoře přišlo po víkendu nebo když se přes noc nechal pootevřený strop domku.

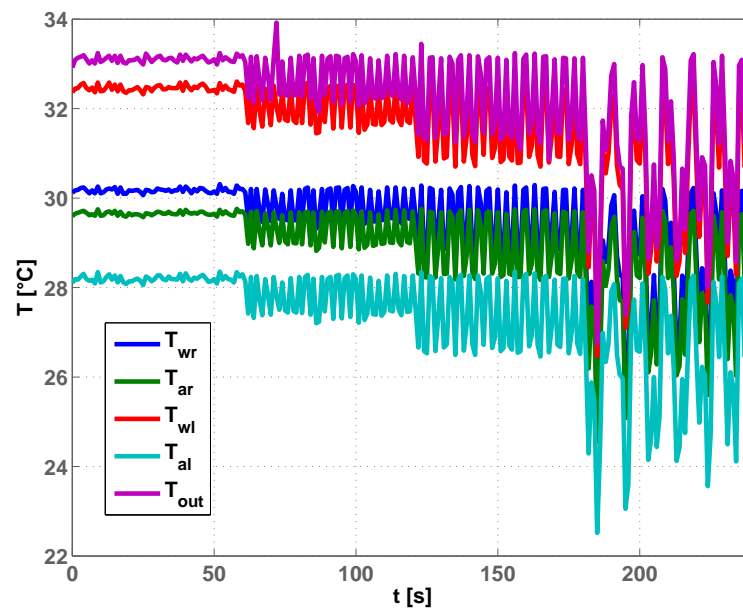
Pro ověření takto ustáleného stavu byl v závěru této práce proveden následující experiment. Na laboratorním domku byla odpojena topná tělesa, Peltierovy články i ventilátory. Průběh teplot při tomto experimentu je zaznamenán na obr. 6.3, kdy byly přibližně po hodině a 10 minutách připojeny ventilátory. Z tohoto měření lze pozorovat, že teploty uvnitř domku narůstaly i přesto, že topná tělesa i Peltierovy články byly odpojeny, což bylo způsobeno nárůstem okolní teploty, která se od začátku tohoto měření změnila z $21,75^{\circ}\text{C}$ na 24°C , tedy o $2,25^{\circ}\text{C}$ za necelé 2 hodiny. Také lze pozorovat, že po připojení ventilátorů prudce poklesla teplota vzduchu uvnitř domku, což bylo patrně způsobeno rozvřením vzduchu. Tento experiment tedy ukazuje, že některá měření nemusela začínat v ustáleném stavu. Stoupající okolní teplota tak mohla negativně ovlivnit měření přechodových charakteristik.

Dalším aspektem ztěžujícím přesná měření bylo zvýšení šumu měřených teplot při zapnutí akčních členů. Proto byl proveden krátký experiment, kdy byla nejen vypnuta ale i hardwarově odpojena topná tělesa a Peltierovy články, včetně ventilátorů. Na místo snímačů teploty Ni1000 byly připojeny pevné rezistory $1200\ \Omega$, jejichž hodnota odpovídá



Obrázek 6.3: Ověření ustáleného stavu

cca teplotě 36°C . Tímto se odstranil možný vliv snímačů teplot. Po minutě od začátku měření byly připojeny ventilátory, po další minutě topná tělesa a nakonec po 3 minutách od začátku měření byly připojeny i Peltierovy články. Toto měření je znázorněno na obr. 6.4, ze kterého je patrné, že každý z akčních členů způsobí zvýšení míry šumu při měření. Důvodem je PWM řízení akčních členů (RABIŇÁK, P., 2014).



Obrázek 6.4: Vliv akčních členů a ventilátorů na měření teplot

V důsledku výše popsaných problémů, které objektivně ztěžovaly identifikaci modelu laboratorního domku, nebyl poslední bod zadání hlouběji realizován. V něm mělo být navrženo řízení, které využije informace ze sensorů umístěných ve stěnách domku. K využití sensorů ve stěnách domku se nabízí možnost vytvořit logiku nadřazenou PID regulaci z kapitol 4 a 5. Ta by vypínala topná tělesa, pokud by bylo ve stěnách akumulováno větší množství tepelné energie. Další možností je použití takové regulace, která by s předstihem snižovala plynule výkon těles při vzrůstu okolní teploty.

Literatura

- BRYNYCH, T. (2017), Návrh energeticky úspornějšího řízení udržovací pece, (Absolventská práce), VOŠ, SŠ, COP Sezimovo Ústí, Sezimovo Ústí.
- FENCLOVÁ, M.; PECH, Z.; SUKOVÁ, M. (1993), *Teorie automatického řízení — návody ke cvičením*, Praha: Vydavatelství ČVUT. ISBN 80-01-01039-2.
- HUMUSOFT (2019), Humusoft s.r.o. [online]. [cit. 2019-04-03], [⟨http://www.humusoft.cz/⟩](http://www.humusoft.cz/).
- PEKÁREK, S.; MURLA, M. (1997), *Fyzika I. Semináře*, Praha: Vydavatelství ČVUT. ISBN 80-01-01633-1.
- RABIŇÁK, P. (2014), Model vytápěného domku – elektronika, (Absolventská práce), VOŠ, SŠ, COP Sezimovo Ústí, Sezimovo Ústí.
- ROUBAL, J. (2012), Výukové materiály pro Laboratoř aplikované informatiky na VOŠ, (Bakalářská práce), ČVUT v Praze, MUVS, Praha.
- ROUBAL, J., HUŠEK, P. A KOL. (2011), *Regulační technika v příkladech*, Praha: BEN – technická literatura. ISBN 978-80-7300-260-2.
- SCHENK, C. (2009), MiKTeX [online]. [cit. 2009-06-16], [⟨http://www.miktex.org/⟩](http://www.miktex.org/).
- THE MATHWORKS (2019), The Mathworks [online]. [cit. 2019-04-03], [⟨http://www.mathworks.com/⟩](http://www.mathworks.com/).
- VOLF, I., JAREŠOVÁ, M. A OUHRABKA, M. (2013), Přenos tepla, Studijní text pro řešitele FO a ostatní zájemce o fyziku [online]. [cit. 2013-11-27], [⟨www.fyzikalniolympiada.cz⟩](http://www.fyzikalniolympiada.cz).

Příloha A

Obsah příloženého CD/DVD

K této práci je přiloženo CD/DVD s následující adresářovou strukturou.

- Absolventská práce v \LaTeX 2 ϵ :
- MATLAB/Simulink: zdrojové kódy pro vykreslení grafů a simulinkové modely jsou umístěny v příslušných podkapitolách ve složce **Absolventské práce v \LaTeX 2 ϵ**
 - kapitola 2
 - * `STFthermometers.m`: kalibrační funkce teploměrů
 - kapitola 3
 - * `House_parameters.m`: parametry domku
 - * `Wall_side_phi.m`: výpočet tepelného toku bočními stěnami
 - * `Wall_back_phi.m`: výpočet tepelného toku zadní stěnou
 - * `Wall_side_phi.m`: výpočet tepelného toku přední stěnou
 - * `Floor_Roof_phi.m`: výpočet tepelného toku podlahou a stropem
 - * `statchar_ac.m`: statické převodní charakteristiky topných těles
 - * `Overall_phi.m`: výpočet celkového tepelného toku
 - kapitola 4
 - * `statchar_Ni1000.m`: statické převodní charakteristiky snímačů Ni1000
 - * `StepResponseFilter_*.*`: vykreslení průběhů naměřené přechodové charakteristiky, její filtrace a identifikace přenosu (naměřená data jsou uložena v `StepResponse_data_2019_06_03.mat`)

- * `PIDcontrol_design.m`: vykreslení GMK s navrženým regulátorem (navržený regulátor v prostředí `sisotool` je uložen v `CsisoTa.mat`)
- * `PIDcontrollinear*.*`: ověření navrženého regulátoru s identifikovaným přenosem
- * `HH_rt_PIDcontrol*.*`: řízení domku a přenosu navrženým regulátorem (naměřená data jsou uložena v `HH_rt_PIDcontrol_Data3.mat` (bez filtrace) a `HH_rt_PIDcontrol_Data4.mat` (s filtrací))
- * `HH_rt_PIDcontrolprint.m`: obrázek regulační smyčky
- * `PIDcontrolSysModel.mdl`: vykreslení signálů z regulace (dat ze souborů `HH_rt_PIDcontrol_Data3.mat` a `HH_rt_PIDcontrol_Data4.mat`)

– kapitola 5

- * soubory v kapitole 5 mají obdobné názvy a strukturu jako soubory v kapitole 4
- Výkresová dokumentace a 3D model by Sedlák VOŠ2: vytvořeno Lukášem Sedlákem v rámci předmětu SAP v roce 2016
- `Marek_AP_2018_2019.pdf` – absolventská práce ve formátu PDF

Příloha B

Použitý software

L^AT_EX 2_ε [⟨http://www.miktex.org/⟩](http://www.miktex.org/)

MATLAB/Simulink R2006b [⟨http://www.mathworks.com⟩](http://www.mathworks.com)

MATLAB/Simulink R2010b [⟨http://www.mathworks.com⟩](http://www.mathworks.com)

WinEdt 5.3 [⟨http://www.winedt.com/⟩](http://www.winedt.com/)

Zoner Callisto 4 [⟨https://www.callisto.cz/⟩](https://www.callisto.cz/)

Software z výše uvedeného seznamu je buď volně dostupný, nebo jeho licenci toho času vlastní Vyšší odborná škola, Střední škola, Centrum odborné přípravy, Sezimovo Ústí, Budějovická 421, kde autor téhož času studoval a vytvořil tuto absolventskou práci.

Příloha C

Časový plán absolventské práce

Činnost	Časová náročnost	Termín ukončení	Splněno
nalezení parametrů domku	2 týdny	07.09.2018	15.09.2018
tvorba m souborů pro výpočet tepelného toku	2 týdny	15.09.2018	30.09.2018
měření tepelného toku v ustáleném stavu	4 týdny	1.10.2018	1.11.2018
AP: kapitola 2	4 týdny	1.11.2018	2.12.2018
kalibrace teploměrů	2 týdny	2.11.2018	16.11.2018
měření statických převodních charakteristik topných těles	1 týden	19.11.2018	24.11.2018
měření statických převodních charakteristik senzorů teplot	2 týdny	27.11.2018	11.12.2018
AP: kapitola 3	6 týdnů	3.12.2018	15.01.2019
měření přechodových charakteristik	2 týdny	16.01.2019	30.01.2019
AP: kapitola 4	6 týdnů	15.01.2019	28.02.2019
identifikace celého domku	3 týdny	1.02.2019	22.02.2019
návrh PID regulátoru pro celý domek	2 týdny	25.02.2019	11.03.2019
AP: kapitola 5	4 týdny	01.03.2019	01.04.2019
návrh PID regulátoru pro levou a pravou místnost	2 týdny	12.03.2019	30.03.2019
AP: kompletní text	4 týdny	01.04.2019	01.05.2019

Příloha D

Hodinový rozpočet projektu

Následující tabulka uvádí hodinový rozpočet absolventské práce práce.

Tabulka D.1: Hodinový rozpočet projektu

Práce	Člověko- hodin	Pracovník
tvorba matematicko-fyzikálního mo- delu	87	autor AP
porovnání teoretického a naměřené- ho tepelného toku	95	autor AP
identifikace	82	autor AP, vedoucí AP
Návrh regulátoru	49	autor AP
Ověření regulátoru	54	autor AP
Text AP	255	autor AP, vedoucí AP
Celkem	622	-