

UNIVERZITA PARDUBICE
Fakulta elektrotechniky a informatiky

**MODELOVÁNÍ, IDENTIFIKACE A ŘÍZENÍ TOPNÉ
SOUSTAVY**

Bc. Martin Šácha

Diplomová práce
2019

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Akademický rok: 2017/2018

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Martin Šácha**
Osobní číslo: **I16201**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Řízení procesů**
Název tématu: **Modelování, identifikace a řízení topné soustavy**
Zadávající katedra: **Katedra řízení procesů**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Cíl práce: Vytvořit matematicko-fyzikální model topné soustavy - kotle a spotřebičů. Na základě modelu navrhnout strategii řízení topné soustavy. Simulačně ověřit návrh řízení. V programu Merbon IDE vytvořit algoritmus řízení podle navržené strategie. Vytvořit funkční blok s možností samočinného nastavení parametrů PID regulátoru pro řízení topných soustav.

Teoretická část: Tvorba matematických modelů soustav a identifikace neznámých parametrů, způsoby regulace topných soustav (akční členy, veličiny, senzory), metody samočinného nastavování PID regulátorů.

Praktická část: Vytvoření matematicko-fyzikálního modelu topné soustavy, návrh a simulační ověření strategie řízení, popis programu Merbon IDE, aplikace algoritmů v programu Merbon IDE, vytvoření funkčního bloku PID regulátoru s možností samočinného nastavení v programu Merbon IDE.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

BALÁTĚ, Jaroslav. Automatické řízení. Praha: BEN - technická literatura, 2003. ISBN 80-730-0020-2.

ŠULC, Bohumil a Miluše VÍTEČKOVÁ. Teorie a praxe návrhu regulačních obvodů. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-010-3007-5.

Domat Control System [online]. Pardubice: Domat Control System, 2013 [cit. 2017-10-18]. Dostupné z: <http://domat-int.com/> Nápověda vývojového prostředí

Merbon [online]. Pardubice: Domat Control System, 2017 [cit. 2017-10-18]. Dostupné z: <http://domat-int.com/ke-stazeni/software/merbonide>

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Daniel Honc, Ph.D.

Katedra řízení procesů

Datum zadání diplomové práce:

31. října 2017

Termín odevzdání diplomové práce:

18. května 2018



Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.
děkan



L.S.



Ing. Daniel Honc, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 8. listopadu 2017

Prohlášení

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 9/2012, bude práce zveřejněna v Univerzitní knihovně a prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 17. 05. 2019

Bc. Martin Šácha

ANOTACE

Práce se zabývá tvorbou matematicko-fyzikálních modelů, způsoby regulace topných soustav a metodami samočinného nastavování PID regulátoru. V práci je řešeno vytvoření matematicko-fyzikálního modelu topné soustavy, návrh strategie řízení a následné simulační ověření strategie. Dále je součástí práce realizace algoritmu pro řízení topné soustavy v programu Merbon IDE a vytvoření funkčního bloku PID regulátoru s možností samočinného nastavení.

KLÍČOVÁ SLOVA

topná soustava, PID regulátor, Merbon IDE, autotuning

TITLE

MODELING, IDENTIFICATION AND CONTROL HEATING SYSTEM

ANNOTATION

A paperwork is oriented to a creating mathematical-physical models, type of regulation heating systems and analysis of the self-adjustment methods PID controllers. In the thesis is solved mathematical-physical model of heating system, proposal of strategy control and verification with using simulation.

Next part of work is oriented to an algorithm control heating system in program Merbon IDE and creation of function block PID regulator with autotuning.

KEYWORDS

Heating system, PID controllers, Merbon IDE, Autotuning

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval panu Ing. Danielovi Honcovi, Ph.D, za odborné rady při tvorbě této diplomové práce. Také bych rád poděkoval celé své rodině za podporu po celou dobu mého studia.

V Pardubicích dne 17. 05. 2019

Bc. Martin Šácha

OBSAH

	Seznam zkratek.....	9
	Seznam symbolů proměnných veličin a funkcí.....	10
	Seznam ilustrací.....	12
	Seznam tabulek.....	14
	ÚVOD.....	15
1	TVORBA MATEMATICKÝCH MODELŮ SOUSTAV.....	16
1.1	Matematický model.....	16
1.1.1	Obecný postup vytváření stochastických modelů.....	17
1.1.2	Obecný postup vytváření deterministických modelů.....	17
1.1.3	Vytváření matematických modelů na základě bilancí.....	20
1.1.4	Počáteční a okrajové podmínky.....	21
2	ZPŮSOBY A PŘÍSTUPY K REGULACI TOPNÝCH SOUSTAV.....	22
2.1	Regulace podle vnitřní teploty.....	22
2.2	Regulace podle venkovní teploty.....	23
2.3	Regulace teploty přívodní vody s využitím směšovače.....	23
2.4	Regulace podle zátěže.....	25
2.5	Ekvitermní regulace s vlivem zátěže.....	26
2.6	Dvoupolohová regulace.....	26
2.7	Třípolohová regulace.....	27
3	VÝVOJ METOD NASTAVOVÁNÍ PID REGULÁTORU.....	29
4	METODY SAMOČINNÉHO NASTAVOVÁNÍ PID REGULÁTORU.....	30
4.1	Metoda optimálního modulu.....	31
4.2	Metoda limitního cyklu.....	33
4.3	Metoda exact.....	35
4.4	Metoda nastavení dle přechodové charakteristiky.....	36
4.4.1	Aproximace přechodové charakteristiky tříbodovou metodou.....	37
4.5	Komerční postupy pro autotuning.....	38
4.5.1	Foxboro.....	39
4.5.2	ABB.....	40
4.5.3	Yokogawa.....	40
5	MATEMATICKO-FYZIKÁLNÍ MODEL TOPNÉ SOUSTAVY.....	41
5.1	Získání matematicko-fyzikálního modelu.....	42

5.2	Simulace navrhnutého modelu	43
6	NÁVRH STRATEGIE ŘÍZENÍ TEPELNÉ SOUSTAVY	47
6.1	Volba ekvitermní křivky.....	47
6.2	Simulace ekvitermní regulace	48
7	POPIS PROGRAMU MERBON IDE	50
7.1	Komunikační protokoly	50
7.2	Typy jednotlivých jazyků	50
7.3	Ladění programu a hledání chyb	52
8	ALGORITMUS EKVITERMNÍ REGULACE V PROGRAMU MERBON IDE	53
9	AUTOTUNE V PROGRAMU MATLAB.....	54
10	AUTOTUNE V PROGRAMU MERBON IDE	59
10.1	Funkční blok Autotune	59
10.1.1	Funkční blok Hledejindex	60
10.2	Funkční blok PI_Autotuning	62
10.3	Hlavní program.....	63
10.3.1	Tepelná soustava v Merbon IDE	64
11	ZHODNOCENÍ.....	66
12	ZÁVĚR.....	67
	POUŽITÁ LITERATURA	68
	PŘÍLOHY	69

SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK

FBD	Function Block Diagram
ICT	Information and Communication Technologies
M-Bus	Meter-Bus
PID	Proportional-Integral-Derivative Controller
PLC	Programmable Logic Controller
SSCP	Systems Security Certified Practitioner
ST	Structured text
TRV	Termostatický regulační ventil

SEZNAM SYMBOLŮ PROMĚNNÝCH VELIČIN A FUNKCÍ

A	amplituda vstupního signálu
B, C	koeficient pro výpočet časové konstanty, s
c	měrná tepelná kapacita vzduchu, $\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$
c_T	měrná tepelná kapacita vody, $\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$
d	tlumení
e	regulační odchylka
K_{ok}	součinitel prostupu tepla mezi místností a okolím (ztráty)
K_T	součinitel prostupu tepla mezi topnou vodou a místností
K_{Tok}	součinitel prostupu tepla mezi topnou vodou a okolím (ztráty)
K_u, K	zesílení
M	amplituda výstupního signálu
m	hmotnost vzduchu v místnosti, kg
m_T	hmotnost vody v radiátoru, kg
O	otevření termostatického ventilu radiátoru
P	suma topného výkonu, W
P_o	tepelný výkon osob v místnosti, W
P_s	prostup tepelného výkonu slunce, W
P_t	výkon radiátoru v místnosti, W
T	teplota v místnosti, °C
$t_{0,9}$	časová konstanta pro 9 % ustálené hodnoty odezvy soustavy, s
$t_{0,26}$	časová konstanta pro 26 % ustálené hodnoty odezvy soustavy, s
$t_{0,7}$	časová konstanta pro 70 % ustálené hodnoty odezvy soustavy, s
T_1, T_2	časová konstanta přenosu soustavy, s
T_d	časová konstanta dopravního zpoždění, s
$t_{k,w \text{ ekv}}$	žádaná teplota kotlové vody podle čistého ekvitermního řízení, °C
$t_{k,w}$	žádaná teplota otopné vody, °C
$t_{k,w,zat}$	žádaná teplota kotlové vody podle čistého řízení zátěže, °C
T_n	doba průtahu, s
T_{ok}	teplota v okolí místnosti, °C
T_p	perioda kmitání
T_T	teplota topné vody, °C
T_u	doba náběhu, s

u	hodnota akční veličiny
y	hodnota regulované veličiny
z	překmit
τ	časová konstanta, s
τ_{BR}	doba chodu hořáku ve spínacím intervalu, s
τ_{BRZ}	doba spínacího intervalu, s

SEZNAM ILUSTRACÍ

Obr. 1.1 - Postup vytváření matematického modelu	18
Obr. 2.1 - Příklad otopné křivky	23
Obr. 2.2 - Regulace teploty přírodní vody s využitím směšování	24
Obr. 2.3 - Určení zátěže kotle	25
Obr. 2.4 - Křivky zátěže	25
Obr. 2.5 - Princip dvupolohové regulace s necitlivostí	27
Obr. 2.6 - Princip třípolohové regulace s necitlivostí	28
Obr. 4.1 - Princip nastavení parametrů regulátoru pomocí relé ve zpětné vazbě	34
Obr. 4.2 - Příklad odezvy na změny žádané a poruchové veličiny	35
Obr. 4.3 - Identifikace parametrů z přechodové charakteristiky	36
Obr. 5.1 - Subsystem tepelné soustavy	42
Obr. 5.2 - Maska subsystému	43
Obr. 5.3 - Model tepelné soustavy v programu Simulink	44
Obr. 5.4 - Průběh teplot v modelu při sepnutí kotle	44
Obr. 6.1 - Ekvitermní křivka pro vytvořený model	46
Obr. 6.2 - Model ekvitermní regulace v programu Simulink	47
Obr. 7.1 - Ukázka programu v jazyce ST	49
Obr. 7.2 - Ukázka programu v jazyce FUPLA	50
Obr. 7.3 - Ukázka ladění programu	50
Obr. 8.1 - Ekvitermní regulace v programu Merbon IDE	51
Obr. 9.1 - Příklad aproximace třibodovou metodou	53
Obr. 9.2 - Aproximace pomocí třibodové metody v programu Matlab	54
Obr. 9.3 - Výpočet parametrů T1 a T2 v programu Matlab	55
Obr. 9.4 - Funkce Hledejindex v programu Matlab	55
Obr. 9.5 - Výpočet parametrů PI regulátoru v programu Matlab	56
Obr. 9.6 - Regulační pochod tepelné soustavy	56
Obr. 10.1 - Funkční blok Autotune	57
Obr. 10.2 - Tělo funkčního bloku Hledejindex	59
Obr. 10.3 - Funkční blok Autotuning	60
Obr. 10.4 - Funkční blok PI_Autotuning	60
Obr. 10.5 - Hlavní program s modelem tepelné soustavy	61
Obr. 10.6 - Průběh výstupní teploty při sepnutí funkce autotuning z Merbon IDE	62

Obr. 10.7 - Průběh teploty v místnosti při výkonu topení o 1 kW.....	63
Obr. 10.8 - Ukázka funkčního bloku simulátoru soustavy	63

SEZNAM TABULEK

Tab. 4.1 - Výpočet parametrů	32
Tab. 4.2 - Výpočet parametrů	33
Tab. 4.3 - Vztahy Zieglera a Nicholse	34
Tab. 4.4 - Přeregulování	40
Tab. 5.1 - Hodnoty tepelného výkonu metabolismu	42
Tab. 10.1 - Přehled vstupů funkčního bloku Autotune.....	60
Tab. 10.2 - Přehled výstupů funkčního bloku Autotuning	60
Tab. 10.3 - Přehled vstupů funkčního bloku PI regulátoru.....	63
Tab. 10.4 - Popis vstupů hlavního programu.....	64

ÚVOD

Práce je věnována tepelným soustavám a strategiím řízení těchto soustav. Motivací k vzniku této práce byla praktická zkušenost ve firmě Domat Control System. Tato firma se zabývá měřením a regulací v inteligentních budovách, kde je velmi často použit v nějaké formě PID regulátor.

Problémem v užívání PID regulátorů je ponechání parametrů na defaultních hodnotách, které určil výrobce. Regulátor pak nějakým způsobem reguluje, ale rozhodně se nedá mluvit o optimálním regulačním pochodu. Hlavním úkolem bylo navrhnout v prostředí Merbon funkční blok PID regulátoru s možností samočinného výpočtu parametrů.

Ve více než v 95 % regulačních obvodů je přítomen PID regulátor, který má vypnutou derivační složku, poté se tedy mluví o PI regulátoru. Pro nastavení parametrů regulátoru existuje několik desítek pravidel. Mezi základní metody nastavení patří např. Ziegler-Nicholsova, či Cohen-Coonova metoda. Tyto metody však vedou až k 50 % přeregulování a kmitavým regulačním pochodům, což bývá často v nesouladu s technologickými požadavky. Taková nastavení nejsou tedy akceptovatelná obsluhou.

Práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. V první kapitole je řešena problematika tvorby matematicko-fyzikálních modelů od počátků vzniku této disciplíny, rozdělení modelů a přehled základních metod tvorby matematicko-fyzikálních modelů. Druhá kapitola pojednává o způsobech regulace tepelných soustav a strategiích řízení. Kapitola třetí se zabývá metodami nastavování PID regulátorů, především metodami samočinného nastavení.

V praktické části je vytvořen konkrétní matematicko-fyzikální model topné soustavy a je navržena vhodná strategie řízení, která je ověřena pomocí simulačních nástrojů. Tato strategie je v podobě algoritmu realizována v programu Merbon IDE. Dále je v programu Merbon IDE vytvořen funkční blok PID regulátoru s možností samočinného nastavení.

1 TVORBA MATEMATICKÝCH MODELŮ SOUSTAV

Pojem model lze velmi často najít v odborné literatuře napříč nejrůznějšími obory. Termín model je tedy možné chápat různými způsoby. Modely mohou v různých oblastech sloužit k odlišným cílům. Slovo model má svůj původ ve stavitelství, kde označuje míru, která určuje proporce stavby, později dostal pojem model zcela jiný význam.

Samotné slovo model má tedy odlišný význam v přírodních, společenských a technických vědách, jiné přístupy v logice, kybernetice a dalších disciplínách. Hlavním kritériem při třídění modelů může být obor, ve kterém model užíváme, zvolené prostředky k nalezení modelu a charakter cílů, kterým konstrukce modelu slouží.

Modely lze jednoduše rozdělit na dvě skupiny, a to materiální a myšlenkové modely. Materiální modely zobrazují reálně existující objekty, myšlenkové modely jsou pouze teoretické. Myšlenkové modely lze dále rozdělit na představové a na symbolické. Prvky symbolických modelů jsou tvořeny symboly nebo znaky a mají velmi blízko k modelům u kterých mají rozhodující význam logické, matematické a fyzikální vlastnosti. Nazývají se modely logické, formální nebo také matematické (Bris, 2014).

1.1 MATEMATICKÝ MODEL

Stav systému popisují hodnoty jeho charakteristických veličin, často bývají označovány jako stavové veličiny. Jedná se například o teplotu, tlak, koncentraci složek apod. Matematický model popisuje matematické vztahy mezi těmito veličinami, obvykle v závislosti na čase. Nejčastěji jsou tyto vztahy vyjádřené pomocí diferenciálních, nelineárních, či lineárních rovnic.

Matematické modely lze dle způsobu vytváření dále rozdělit do dvou základních kategorií:

1. Stochastické modely, které předpokládají, že model procesu je uzavřený systém s definovanými vstupy a výstupy.
2. Deterministické modely, které jsou odvozovány pomocí analýzy a matematického popisu skutečné podstaty děje.

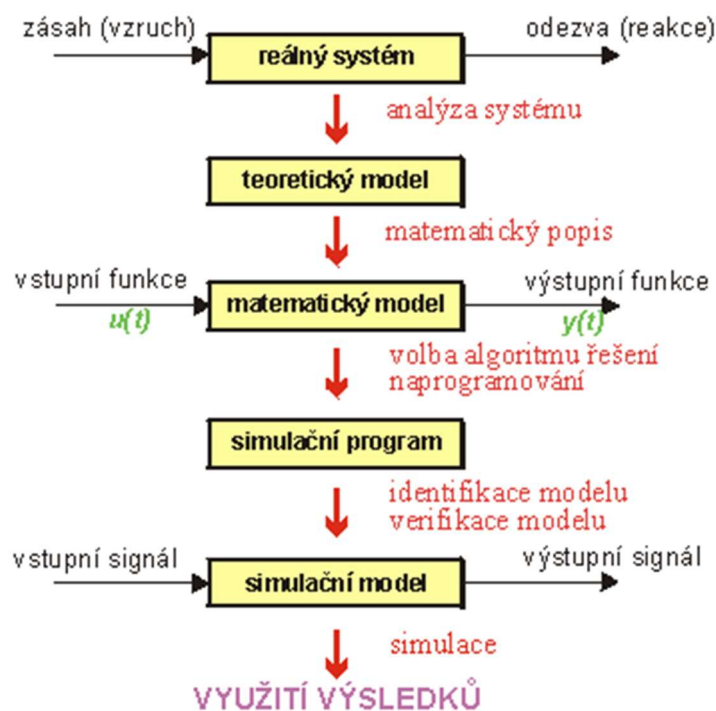
Tyto modely lze dále dělit podle časové závislosti na dynamické a statické nebo dle spojitosti na spojitě a diskrétní. Matematické modely jsou tvořeny proměnnými, které jsou abstrakcí veličin daného systému a operátory nad těmito proměnnými, které reprezentují algebraické operace. Pokud jsou operátory matematického modelu lineární, je i model lineární, v opačném případě se jedná o model nelineární (Kadlec, 2005).

1.1.1 Obecný postup vytváření stochastických modelů

Tento postup je používán v případě, pokud není možné odvodit deterministický model na základě analýzy systému. Na vstup systému přivádíme signál a dle vhodné vzorkovací frekvence měříme hodnoty výstupního signálu. Výsledkem je řada odpovídajících dvojic hodnot. Na základě předpokládaného chování systému se zvolí vhodný tvar matematického modelu, který obsahuje parametry neznámých hodnot. Výsledky měření se zpracují tak, aby se získali příslušné parametry zvoleného matematického modelu (Kadlec, 2005).

1.1.2 Obecný postup vytváření deterministických modelů

Při tvorbě deterministických modelů se vychází z fyzikálních, fyzikálně-chemických a chemických zákonů, které lze matematicky vyjádřit. Teoreticky je možné zcela popsat všechny zadané podmínky a vztahy modelovaného systému a získat tak přesný model. Takový model by byl ale velmi složitý a jeho řešení prakticky nemožné. Pro sestavení zcela přesného modelu je zapotřebí znát důkladně celý průběh děje do detailních podrobností. V praxi ve většině aplikací není potřeba zcela přesný model, ale stačí když model vystihuje podstatné vlastnosti a chování modelovaného procesu. Je tedy žádoucí zanedbat některé méně podstatné vlivy a tím výsledný model zjednodušit. Kritériem kvality k posouzení použitelnosti modelu je vždy jeho porovnání s reálným systémem v souladu s účelem, ke kterému byl model vytvořen (Kadlec, 2005).



Obr. 1.1– Postup vytváření matematického modelu (Kadlec, 2005)

Při tvorbě deterministického modelu je nejprve nutné provést důkladnou analýzu procesu, při které se provádí následující kroky:

1. provede se specifikace dějů, které v procesu probíhají,
2. určí se vlivy, které na proces působí,
3. definují se stavové veličiny,
4. rozhodne se o zanedbání nepodstatných prvků modelu,
5. rozhodne se o možnosti zjednodušení jednotlivých částí.

Výsledkem výše popsaného postupu je tzv. teoretický model, který zcela přesně neodpovídá skutečnému systému, ale jeho hlavními výhodami jsou jednoduchost, přehlednost, a tedy i následně snazší řešení výsledných rovnic.

V bodu číslo 5 se provádí úvaha o možnosti zjednodušení matematických vztahů, což souvisí s bodem číslo 4, tedy se zanedbáním nepodstatných veličin. Tyto dva kroky jsou velmi důležité a mají podstatný vliv na výslednou kvalitu teoretického modelu. Možnosti nejčastěji prováděných zjednodušení jsou následující:

1. rozdělení složitého systému na jednodušší subsystemy,
2. zavedení ideálních předpokladů, např. ideální plyn, ideální kapalina,
3. předpoklad nezávislosti vlastností na teplotě,
4. předpoklad homogenity a izotropie,

5. zanedbání ztrát,
6. linearizace nelineárních závislostí,
7. zavedení korekčních koeficientů,
8. užití empirických vztahů a závislostí,
9. zjednodušení geometrických proporcí a volba vhodného souřadnicového systému.

V druhé fázi se již na základě teoretického modelu sestavuje pomocí matematických vztahů matematický popis procesu, kde se provádějí následující kroky:

1. výběr zákonitostí popsanych v teoretickém modelu k matematickému popisu,
2. vytvoření modelových rovnic na základě teoretického modelu a provedení potřebných matematických úprav,
3. definování podmínek řešení, obvykle počátečních omezujících podmínek pro řešení diferenciálních rovnic.

V této fázi se tvoří matematické rovnice na základě známých fyzikálních a chemických zákonů. Výsledkem je obecný matematický model procesu. Mohou nastat případy, ve kterých není možné vytvořený teoretický model popsat matematickými vztahy a je nutné se vrátit do první fáze a zvážit zavedení dalších nebo jiných předpokladů, nebo v krajním případě použít jiný popis děje, například pomocí stochastického modelu.

Třetí fáze se již zabývá řešením modelu. Jinými slovy jde o vytvoření simulačního programu, což obnáší provést následující:

1. volbu metody řešení matematických rovnic,
2. zpracování modelových rovnic pomocí výpočetní techniky a nalezení vhodného algoritmu řešení,
3. sestavení výpočetního programu.

Čtvrtou fází je vytvoření simulačního modelu a to zahrnuje tyto kroky:

1. identifikace modelu a určení neznámých parametrů,
2. verifikace modelu.

Pokud model vyhovuje požadovanému účelu, je vše v pořádku. V opačném případě je nutné návrat do první fáze, tedy vytvořit nový teoretický model a celý postup znovu zopakovat. Z výše uvedeného postupu je zřejmé, že se nejedná o elementární záležitost, přesto je ale hlavní předností popsaného postupu přehlednost a nutnost úvahy nad podstatou studovaného děje (Kadlec, 2005).

1.1.3 Vytváření matematických modelů na základě bilancí

Vytváření matematických modelů pomocí bilancí se provádí na základě aplikace fyzikálních zákonů o zachování, nejčastěji energie a hmoty, na daný systém. V těchto případech se hovoří o látkových a energetických bilancích. Využití této metody je velmi časté, dle odhadů se tato metoda využívá k tvorbě v 70 % až 80 % případů.

Pro užití této metody je nutná znalost dvou základních pojmů. Prvním pojmem je bilancovaný systém, čímž je myšlen soubor veličin, které jsou na objektu významné, zbývající část je označována jako okolí systému. Druhým pojmem je bilanční časový interval, což je časový úsek, v kterém bilancované veličiny sledujeme.

Základní bilanční rovnice má tvar

$$VSTUP + ZDROJ = VÝSTUP + AKUMULACE.$$

VSTUP je množství bilancované veličiny, které za bilanční časový interval působí na bilancovaný systém.

VÝSTUP je množství bilancované veličiny, které za bilanční časový interval vystoupí ze systému.

ZDROJ je množství bilancované veličiny, které za bilanční časový interval uvnitř systému vznikne z nebilancované veličiny nebo se přemění na jinou bilancovanou veličinu.

AKUMULACE je změna množství bilancované veličiny uvnitř systému na bilanční časový interval.

Před samotným bilancováním je tedy důležité zvolit bilanční časový interval, jehož volba se řídí následujícími jednoduchými pravidly:

1. V případě, že je bilancován ustálený stav systému, je možné volit libovolný časový interval, obvykle se však v takových případech volí jednotkový.
2. V případě bilancování dynamického systému je nutné volit bilanční časový interval infinitezimálně malý.

Další důležitou částí celého postupu je volba hranic systému. Tyto hranice se určují na základě konstrukčního tvaru systému, ale také na základě toho, jestli je tvořen model systému se soustřednými parametry, tj. souřadnice nefigurují v matematickém popisu jako nezávisle proměnné, nebo s rozloženými parametry, tj. pokud je alespoň jedna souřadnice v matematickém popisu použita jako nezávisle proměnná. Pravidla pro volbu hranic jsou analogické jako u volby bilančního časového intervalu:

1. V případě, že se jedná o model se soustřednými parametry, je volba velikosti hranic systému libovolná.

2. V případě, že se jedná o model s rozloženými parametry, je volba velikosti hranic bilancovaného systému ve směru té souřadnice, která figuruje v modelu jako nezávisle proměnná a musí být infinitezimálně malá.

S volbou hranic systému souvisí volba vhodné souřadnicové soustavy. Cílem je zvolit takový souřadnicový systém, aby byl matematický model co nejjednodušší. Základní souřadnicové systémy jsou

1. kartézský (pravoúhlý),
2. cylindrický (válcový),
3. sférický (kulový).

1.1.4 Počáteční a okrajové podmínky

U matematických modelů, které tvoří diferenciální rovnice, je nutné doplnit příslušný počet okrajových a počátečních podmínek. Tento počet je závislý na nejvyšším se vyskytujícím řádu derivace příslušné proměnné. Formulace těchto podmínek je nedílnou součástí matematického modelu soustavy.

Počáteční podmínka je ve většině případů jedna a jak již její název napovídá, definuje počáteční stav sledované veličiny (Kadlec, 2005).

2 ZPŮSOBY A PŘÍSTUPY K REGULACI TOPNÝCH SOUSTAV

V různých objektech lze obecně použít různé typy regulací. Regulovat lze, dle:

1. Výstupní teploty vody ze zdroje tepla.
2. Vnitřní teploty vzduchu, a to:
 - a. přímo, kdy je regulován přímo zdroj tepla,
 - b. nepřímo, kdy je regulována teplota otopné vody a zdroj tepla je regulován samostatně,
 - c. místně, kdy je jednotlivě regulován výkon otopných těles a zdroj tepla je regulován samostatně.

3. Venkovní teploty vzduchu, kde regulace závisí na klimatických podmínkách okolí.

Regulace může být opět

- a. přímá, kdy je regulován přímo zdroj tepla,
 - b. nepřímá, kdy je regulována teplota otopné vody a zdroj tepla je regulován samostatně.
4. Zátěže či zátěží, tato regulace je přímá a využívá se fuzzy logiky
Toto je základní rozdělení, dle typu regulovaného média (Bašta, 2007).

2.1 REGULACE PODLE VNITŘNÍ TEPLoty

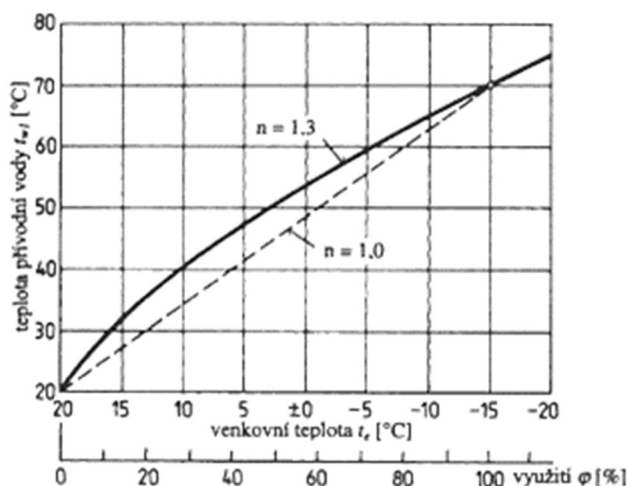
Jedná se o jednu z nejpoužívanějších regulací, jelikož je velmi jednoduchá. Měří se teplota vzduchu v referenční místnosti a tato získaná veličina je posílána do regulátoru. Měřená teplota je porovnána s žádanou a vzniklá regulační odchylka způsobí akční zásah, v tomto případě změnu teploty otopné vody.

Tato regulace má jasnou nevýhodu a to tu, že teplota se začne měnit ve všech místnostech, i když to není žádoucí. Záleží tedy na umístění teplotního čidla. Tento způsob regulace není vhodný u rozlehklých bytů a vícegeneračních domů.

K tomuto typu regulace jsou vhodné regulátory typu P a PI, dvoupolohové se zpětnou vazbou, nebo se dá použít kaskádová regulace. Je důležité, aby teplotní čidlo bylo umístěno na takovém místě, kde nebude docházet k ovlivnění jinými zdroji tepla. Výhodným doplňkem k tomuto typu regulace je osazení radiátorů termostatickými ventily (TRV). V místnosti, kde měříme referenční teplotu, tak se TRV neumísťuje, aby nedocházelo k vzájemnému ovlivnění regulace (Bašta, 2007).

2.2 REGULACE PODLE VENKOVNÍ TEPLoty

U tohoto typu regulace je regulována teplota přívodní vody do spotřebičů v závislosti na teplotě venkovní. Tuto závislost vyjadřuje takzvaná otopná křivka, která je zobrazena na obr. 2.1. Výsledná podoba křivky je odvozena podle typu použitých topných těles, resp. použité otopné plochy. Křivka odpovídá mocninné funkci. Křivka se dá tedy uzpůsobit pro konkrétní systém a jeho vlastnosti pomocí náklonu, posunu, či prohnutí. Teplota otopné vody se reguluje dvoupolohově nebo třípolohově.



Obr. 2.1 – Příklad otopné křivky (Bašta, 2007)

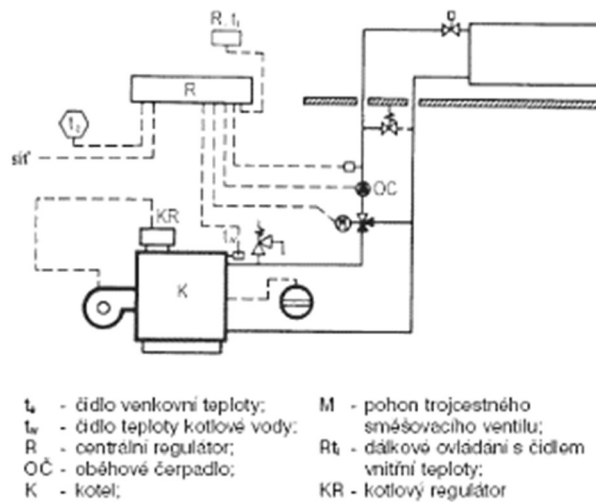
Tento způsob regulace je nejčastěji označován jako exvitermní regulace. Principiálně se tedy vypočítává optimální potřeba tepla pro vytopení konkrétního objektu v závislosti na venkovní teplotě tak, aby tepelné ztráty byly co nejmenší. Na venkovní fasádě musí být umístěno čidlo teploty, které dává informaci regulátoru a ten na základě nastavení otopné charakteristiky vypočte teplotu otopné vody.

Průběh otopné křivky je závislý na projektovaném teplotním spádu otopných těles, na druhu otopné soustavy, jako jsou například otopná tělesa, sálavé vytápění, stropní, podlahové, či stěnové vytápění a v neposlední řadě na vlastnostech vytápěného objektu. V jednotlivých prostorách je potřebná ještě místní regulace prostřednictvím termo regulačních ventilů.

2.3 REGULACE TEPLoty PŘÍVODNÍ VODY S VYUŽITÍM SMĚŠOVAČE

Tento způsob regulace je zobrazen na obr. 2.2. Výhodou této regulace přívodní vody je, že kotel pracuje s konstantní teplotou. Aby nebyla regulace náchylná na krátké teplotní výkyvy,

je aktuální venkovní teplota převedena na tzv. geometrickou venkovní teplotu. Regulace rozlišuje dva příklady vlivu venkovní teploty, a to u těžké budovy a u lehké budovy.



Obr. 2.2 – Regulace teploty přívodní vody s využitím směšování (Bašta, 2007)

Funkce ekvitermní regulace je silně závislá na správné volbě ekvitermní křivky. Otopná křivka však neobsahuje tepelné zisky, které mají také vliv na vytápění. Při použití ekvitermního regulátoru, je udávaná úspora tepla vzhledem k původní spotřebě v závislosti na typu objektu 10 % až 25 %. V případě doplnění o tzv. zónovou regulaci v podobě TRV lze dosáhnout úspory tepla až 30 %.

2.4 REGULACE PODLE ZÁTĚŽE

V tomto principu se jedná o řízení teploty vody v závislosti na potřebě tepla, ale bez nutnosti znalosti okolní teploty. S rozvojem technologií roste i kvalita izolačních vlastností budov a venkovní teplota má tak na reálnou potřebu tepla stále menší vliv. Regulace podle zátěže a regulace podle potřeby tepla jsou principiálně zcela shodné. Oba případy vychází z křivky zátěže, resp. z křivky potřeby tepla.

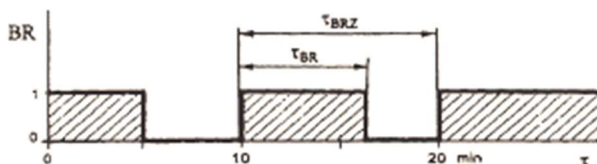
Teplu, které je potřeba, vypočítá regulátor pomocí poměru časů spínání hořáku jako aktuální zátěž kotle q dle vztahu

$$q = \frac{\tau_{BR}}{\tau_{BRZ}}, \quad (2.1)$$

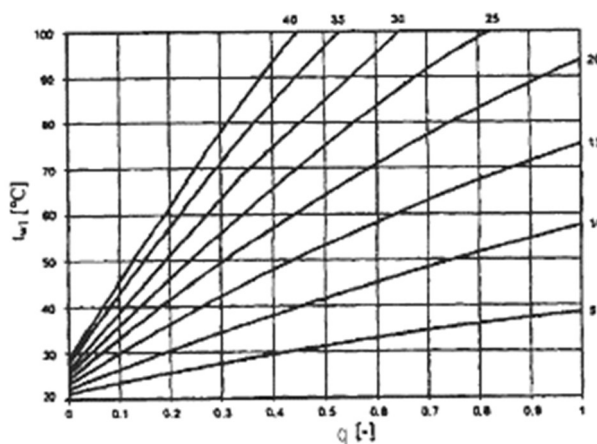
kde τ_{BR} je doba chodu hořáku ve spínacím intervalu, s,

τ_{BRZ} – doba spínacího intervalu, s.

Určení poměrů časů se nachází na obr. 2.3. Požadovaná teplota vody přiváděné do soustavy je řízena podle křivek zátěže na obr. 2.4. Hlavními výhodami tohoto typu regulace jsou rychlá odezva na potřebu tepla, za předpokladu dobře izolovaných budov a dodání pouze aktuálně potřebného množství tepla. Za drobnou nevýhodu se dá považovat nutnost použití místní regulace, tedy termostatických regulačních ventilů.



Obr. 2.3 – Určení zátěže kotle (Bašta, 2007)



Obr. 2.4 – Křivky zátěže (Bašta, 2007)

Nasazení regulace podle zátěže má význam za splnění těchto předpokladů:

1. objekt je dobře tepelně izolován,
2. zdroj tepla obsahuje jednostupňový hořák,
3. otopný okruh je přímo připojený ke zdroji tepla,
4. jsou užity TRV,
5. instalace neobsahuje venkovní a vnitřní teplotní čidla (Bašta, 2007).

2.5 EKVITERMNÍ REGULACE S VLIVEM ZÁTĚŽE

Jedná se o spojení ekvitermní regulace se zohledněním aktuální potřeby tepla. V tomto typu regulace je požadovaná teplota otopné vody tvořena jako kombinace ekvitermní regulace a řízení zátěží. Požadovaná teplota vstupní vody do soustavy je vypočítána jako střední hodnota z otopné a zátěžové křivky dle rovnice

$$t_{k,w} = \frac{t_{k,w,ekv} + t_{k,w,zat}}{2}, \quad (2.2)$$

kde $t_{k,w}$ je žádaná teplota otopné vody, °C,

$t_{k,w,ekv}$ – žádaná teplota kotlové vody podle čistého ekvitermního řízení, °C,

$t_{k,w,zat}$ – žádaná teplota kotlové vody podle čistého řízení zátěže, °C.

K zajištění optimální regulace je nutným předpokladem znát informace o dynamických a statických vlastnostech regulované soustavy (Bašta, 2007).

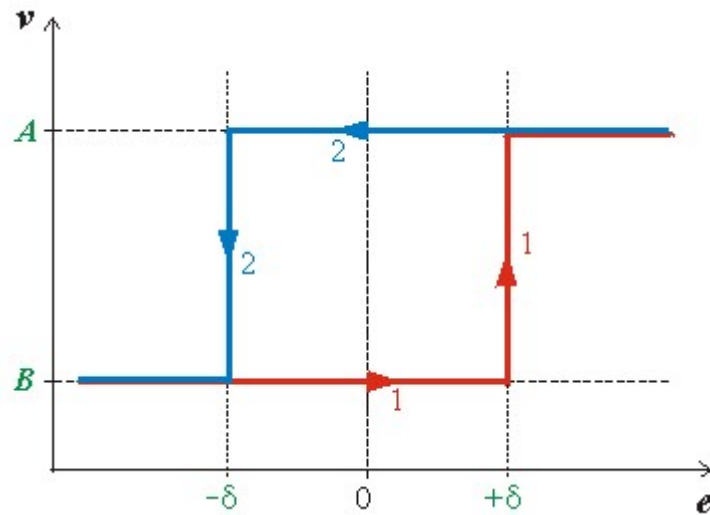
2.6 DVOUPOLOHOVÁ REGULACE

Jedná se o způsob regulace, který je v praxi velmi často využíván. Jde o velmi jednoduchý princip a používá se v případech, v kterých nejsou kladeny vysoké nároky na přesnost regulace. Právě pro jeho jednoduchost je hlavní předností tohoto způsobu nízká pořizovací cena.

Jak již název napovídá, nejedná se o spojitý způsob regulace, ale pracuje ve dvou mezních polohách. Polohou jsou myšleny v podstatě dva stavy, které se v závislosti na vstupu střídají na výstupu regulátoru. Pod těmito stavy se skrývají hodnoty, které představují například otevřeno – zavřeno, zapnuto – vypnuto.

Dvoupolohový regulátor bývá velmi často vybaven předem definovatelným pásmem necitlivosti na změnu regulované veličiny v rozmezí $\pm \delta$ kolem žádané hodnoty. U většiny akčních členů je to nutnost, aby nedocházelo k příliš častému přepínání stavů a k následnému zničení akčního členu.

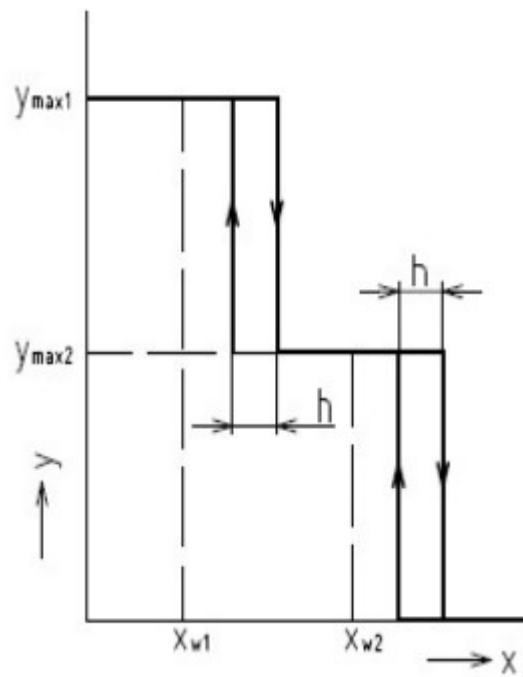
Princip dvupolohové regulace s nastavenou hysterezí je zobrazen na obr. 2.5. Pracovní polohy jsou obecně označeny jako A a B . Na obrázku je vidět, že při růstu regulační odchylky e se akční veličina v mění podle čáry 1, až při dosažení hodnoty $+\delta$. Obdobným způsobem se stav regulátoru změní při poklesu regulační odchylky. Je důležité, že regulátor nereaguje v bodu $e = 0$ a zachovává předchozí hodnotu akční veličiny (Ústav počítačové a řídicí techniky, 2013).



Obr. 2.5 - Princip dvupolohové regulace s necitlivostí (Ústav počítačové a řídicí techniky, 2013)

2.7 TŘÍPOLOHOVÁ REGULACE

Princip třípolohové regulace vychází z dvupolohové, ale regulátor má místo dvou pevných poloh ještě jednu navíc, může tedy nabývat tří stavů. Třetí hodnotu akční veličiny je důležité vhodně zvolit tak, aby třípolohový regulátor přinesl zlepšení regulačního pochodu. Na obr. 2.6 je vidět princip třípolohového regulátoru, který je obdobný jako u dvupolohového (Nespojité regulátory, 2019).



Obr. 2.6 - Princip třípolohové regulace s necitlivostí (Nespojité regulátory, 2019)

3 VÝVOJ METOD NASTAVOVÁNÍ PID REGULÁTORU

Již několik generací techniků se snaží vymyslet nebo zdokonalit metody, které slouží k nastavení parametrů PID regulátorů. Cílem těchto metod je jednoduché, bezpečné a spolehlivé získání optimálních parametrů regulátoru a tím zajistit požadované chování celého procesu. Jedna ze základních metod je známá Zieglerova-Nicholsova metoda, která umožňuje získat parametry vyřešením jednoduchých lineárních rovnic. K použití této metody je ovšem nutné znát kritické hodnoty zesílení a dobu periody, k jejichž získání je nutné provést identifikační experiment v podobě rozkmitání regulované soustavy. V praxi provedení takového experimentu není možné u každé soustavy, což donutilo pány Chiena, Hronese a Reswicka a po nich další, aby Zieglerovu-Nicholsovu metodu zdokonalili. Výsledkem tohoto zdokonalení je možnost volby požadovaného průběhu regulační odezvy na aperiodický, nebo pouze s jedním překmitem (Vogelei, 2004).

Tato nově vzniklá metoda dosahuje lepších výsledků než původní Zieglerova-Nicholsova, obě ale vedou k uspokojivým výsledkům pouze v úzké skupině procesů s dynamickým chováním soustav, popsatelnými rovnicemi druhého, nejvýše třetího řádu. S rostoucím řádem soustavy a zvětšujícím se dopravním zpožděním se výsledný regulační pochod rapidně vzdaluje od optimálního. K dosažení vyhovujícího nastavení je tak nutná zdlouhavá optimalizace zkušeného technika.

Tento problém dovedl výrobce k návrhu speciálních regulátorů, které dosahují v určených oblastech lepších výsledků než běžné univerzální regulátory. Vznikly tak regulátory určené pro tepelné soustavy, pro zpracování plastů apod. U těchto regulátorů nedochází ve všech regulačních smyčkách k optimálním výsledkům, ale v 80 % aplikací je regulační pochod dostačující (Vogelei, 2004).

Dnes již nějakou optimalizační metodou disponuje téměř většina dostupných číslicových regulátorů. Každá firma k optimalizaci používá svůj implementovaný algoritmus.

4 METODY SAMOČINNÉHO NASTAVOVÁNÍ PID REGULÁTORU

Self-tuning, autotuning, neboli samočinné nastavení regulátoru je ve své podstatě jednorázové nastavení regulátoru, které je provedeno na přímý povel operátora popř. v určité definované situaci (Hlava, 2000).

Metody samočinného nastavení PID regulátoru vychází z metod pro adaptivní regulaci. Uživatelské spuštění algoritmu pro automatické nastavení je nejčastěji řešeno stisknutím tlačítka na regulátoru a tím se prakticky podstatně zjednodušuje celý proces nastavení.

Před spuštěním funkce autotuning je důležité zkontrolovat rozvržení procesu včetně všech senzorů a akčních členů. V případě oscilace regulované veličiny, která je zapříčiněna například třením v akčním členu dojde po spuštění funkce autotuning ke snížení zesílení regulátoru. Tímto zásahem oscilace nezmizí, pouze se prodlouží perioda jednotlivých kmitů. V těchto případech nenahradí žádný algoritmus pro automatické nastavení PID regulátoru zkušeného technika.

První možností určení parametrů PID regulátoru je pomocí identifikace parametrů z přechodové charakteristiky. Po aktivaci funkce autotuning regulátor zaznamenává reakci procesu na uměle vyvolanou poruchu a tím získává primární informace o soustavě. K nasimulování poruchy se zpravidla používá skok nebo impuls. Důležité je, aby byla zajištěna stabilita procesu. Většina matematických modelů obsahuje tři základní parametry, a to statické zesílení, globální časovou konstantu a dopravní zpoždění. Statické zesílení se získá z ustálených hodnot regulované a akční veličiny před vyvoláním poruchy a po ní. Zbylé dva parametry je možné určit z přechodové charakteristiky. V případě znalosti těchto tří parametrů je již možné pomocí řady postupů určit parametry PID regulátoru.

Dále se dají parametry PID regulátoru určit z kritických hodnot. To tak, že je proces buzen harmonickým signálem a zaznamenává se odezva procesu. Velmi často se používá zapojení s relé ve zpětné vazbě, které způsobí na výstupu soustavy harmonický signál. Právě perioda a amplituda tohoto signálu určuje kritické hodnoty. Na základě těchto hodnot se již pomocí Ziegler-Nicholsových vztahů určí parametry PID regulátoru.

Třetí metodou určování parametrů je tzv. rekurzivní identifikace, které využívají metodu nejmenších čtverců k průběžným odhadům parametrů. Výhodou těchto metod je, že není nutné soustavu rozkmitávat nebo vyvolávat umělou poruchu.

Čtvrtá kategorie metod není založena na matematickém modelu, ale využívá určitá pravidla, která napodobují uvažování zkušených operátorů. Výsledné parametry PID se upravují na základě kvantitativních ukazatelů (Klán, 2009).

4.1 METODA OPTIMÁLNÍHO MODULU

Metoda optimálního modulu pro volbu nastavení parametrů regulátoru, odvozená H. Sartoniem, vychází z přenosu uzavřeného regulačního obvodu.

Regulátor vygeneruje skokovou změnu akční veličiny a zaznamenává přechodovou charakteristiku, kterou následně aproximuje přenosem soustavy prvního řádu s jednou násobnou časovou konstantou

$$G_M(S) = \frac{K}{(\tau_M S + 1)^n}, \text{ kde } n \leq 8, \quad (4.1)$$

kde G_M je přenos soustavy,
 K – zesílení soustavy,
 τ_M – časová konstanta soustavy, s,
 n – řád soustavy.

Na základě výsledného přenosu regulované soustavy jsou vypočítány parametry regulátoru dle tab. 4.1.

Tab. 4.1 – Výpočet parametrů (Noskievič, 1999)

	Přenos regulované soustavy
Typ regulátoru	$G_s(s) = \frac{K}{(1 + sT)^n}$
P	$r_0 = \frac{1}{K} \cdot \frac{1}{n-1}$
I	$r_{-1} = \frac{1}{KT} \cdot \frac{1}{2n}$
PI	$r_0 = \frac{1}{K} \cdot \frac{n+2}{4(n-1)}$ $r_{-1} = \frac{3}{4KT} \cdot \frac{1}{n-1}$
PID	$r_0 = \frac{7n+16}{16K(n-2)}$ $r_{-1} = \frac{15}{16KT(n-2)}$ $r_1 = \frac{T(n+1)(n+3)}{16K(n-2)}$

Tuto metodu používá ve svých regulátorech například společnost Siemens (Konfršt, 2014).

Vyšší regulátory aproximují soustavu přenosem soustavy druhého řádu

$$G(s) = \frac{K}{(T_1s + 1) \cdot (T_2s + 1)} \cdot e^{-T_d s}, \quad (4.2)$$

kde G je přenos soustavy,

K – zesílení soustavy,

T_1 – časová konstanta soustavy, s,

T_2 – časová konstanta soustavy, s,

e – Eulerovo číslo,

T_d – časová konstanta dopravního zpoždění, s.

Na základě parametrů nalezeného modelu lze vypočítat výsledné parametry regulátoru dle tab. 4.2.

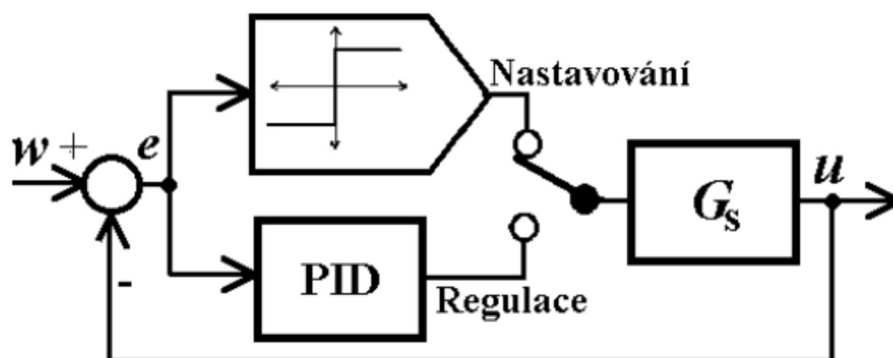
Tab. 4.2 – Výpočet parametrů (Noskievič, 1999)

	Přenos regulované soustavy
Typ regulátoru	$G(s) = \frac{K}{(T_1s + 1) \cdot (T_2s + 1)} \cdot e^{-T_d s}$
P	$r_0 = \frac{\tau^2 + 1}{2K\tau}$
I	$r_{-1} = \frac{1}{2kT_1} \cdot \frac{1}{1 + \tau}$
PI	$r_0 = \frac{\tau^2 + 1}{2K\tau}$ $r_{-1} = \frac{1}{r_0} \cdot \frac{1}{2KT_1} \cdot \frac{\tau^2 + \tau + 1}{\tau(1 + \tau)}$
PID	$r_0 \rightarrow \infty$ $r_{-1} \rightarrow \infty$ $r_1 \rightarrow 0$

4.2 METODA LIMITNÍHO CYKLU

Tato metoda je založená na rozkmitání obvodu, tedy na přivedení soustavy na mez stability. Výstupem soustavy je pak přibližně harmonický signál s konstantní amplitudou a periodou kmitání T_p .

Základem této metody je uzavřený regulační obvod, ve kterém je místo regulátoru zapojeno dvoustavové relé. Při vhodném nastavení relé se většina soustav v tomto zapojení rozkmitá a uzavřená smyčka se dostane do tzv. limitního cyklu.



Obr. 4.1 – Princip nastavení parametrů regulátoru pomocí relé ve zpětné vazbě (Hlava, 2000)

V první fázi je regulátor odpojen od soustavy. Je-li na vstup soustavy přiváděn z relé obdélníkový signál s amplitudou A a amplituda kmitů na výstupu soustavy je M , pak je definováno mezní zesílení vztahem

$$K_u = \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot A}, \quad (4.3)$$

kde K_u mezní zesílení soustavy,

M – amplituda kmitu na výstupu soustavy,

π – Ludolfovo číslo,

A – amplituda vstupního signálu.

Toto zesílení odpovídá velikosti proporcionální složky P regulátoru, které přivede soustavu na mez stability. Konkrétní parametry PID regulátoru se vypočtou dle vztahů Zieglera a Nicholse z tab. 4.3.

Tab. 4.3 – Vztahy Zieglera a Nicholse

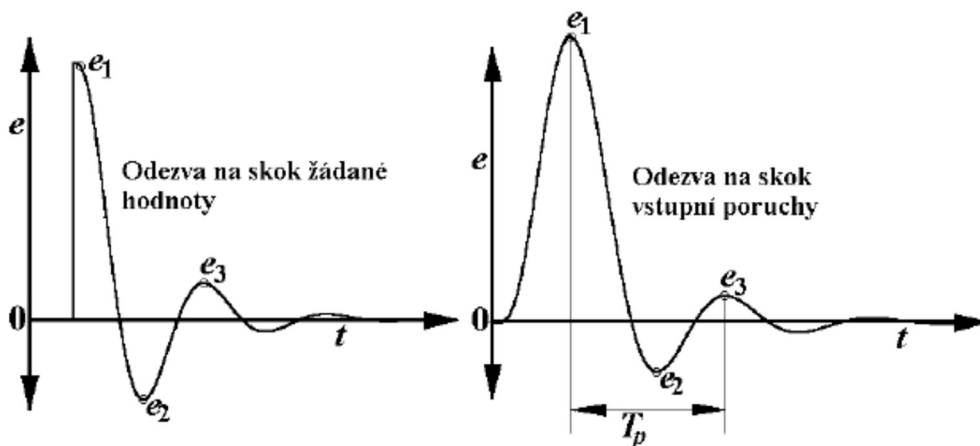
K_p	K_i	K_d
$0,6K_u$	$1,2 \frac{K_u}{T_u}$	$0,072K_u T_u$

Tuto metodu samočinného nastavení použila poprvé švédská firma Satt Control Instruments ve svých regulátorech. Dnes je běžně implementována v regulátorech společností ABB, PMA, Siemens, atd.

Ne vždy je možné z technologických důvodů regulovanou soustavu rozkmitat, což znemožňuje použitelnost této metody v praxi. V případech, kdy je možné si dovolit dostat soustavu na mez stability má tato metoda velmi dobré výsledky (Konfršt, 2014).

4.3 METODA EXACT

Princip metody EXACT (Expert Adaptive Controller Tuning) spočívá v zaznamenání odezvy uzavřeného regulačního obvodu na změny žádané a poruchové veličiny. Příklad odezvy je zobrazen na obr. 4.2.



Obr. 4.2 – Příklad odezvy na změny žádané a poruchové veličiny (Hlava, 2000)

Algoritmus samočinného nastavení je spuštěn v případě, že je regulační odchylka větší než dvojnásobek hladiny šumu. Postupně je detekována trojice lokálních maxim odezvy, kterou je pak možné popsat pomocí periody kmitů T_p , tlumení d a překmitu z následovně:

$$d = \left| \frac{e_3 - e_2}{e_1 - e_2} \right|, d \in \langle 0, 1; 1 \rangle, \quad (4.4)$$

$$z = \left| \frac{e_2}{e_1} \right|, z \in \langle 0; 1 \rangle, \quad (4.5)$$

kde d je tlumení,
 e – regulační odchylka,
 z – překmit.

Uživatel může ovlivnit průběh regulačního pochodu pomocí nastavení maximální hodnoty z a d , doporučené hodnoty jsou pro $d_{\max} = 0,5$ a pro $z_{\max} = 0,3$. Na základě těchto definovaných hodnot algoritmus nastavuje parametry regulátoru tak, aby se blížily udaným maximům, zároveň nastavuje vhodný poměr časových konstant PID regulátoru k periodě T_p .

Před provedením samotného nastavovacího algoritmu EXACT je nutné provést nejprve předběžné nastavení regulátoru. Toto nastavení je zajištěno pomocí vyhodnocení přechodové odezvy regulované soustavy (Konfršt, 2014).

4.4 METODA NASTAVENÍ DLE PŘECHODOVÉ CHARAKTERISTIKY

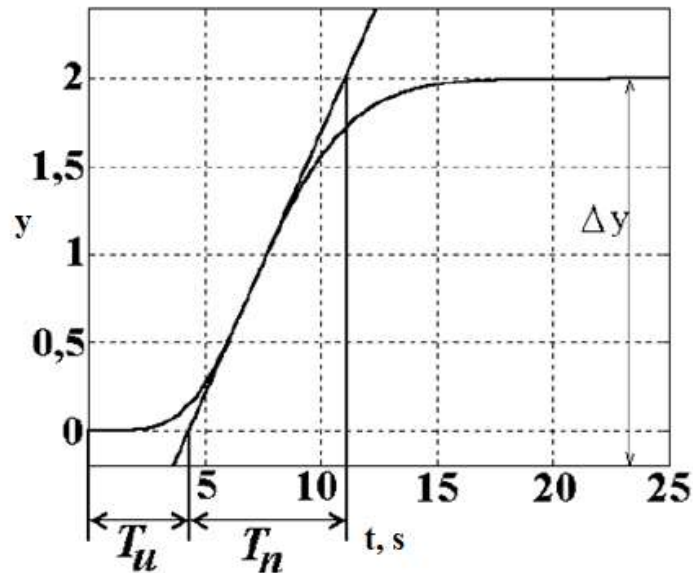
Tato metoda, jak již název napovídá, je založena na identifikaci přechodové charakteristiky soustavy. K získání parametrů PID regulátoru z přechodové charakteristiky je nutné definovat směrnici tečny v inflexním bodě. Na základě této tečny lze určit dobu průtahu T_u a dobu náběhu T_n . Z doby náběhu a doby průtahu se určí tzv. normalizované dopravní zpoždění

$$\tau = \frac{T_u}{T_n}, \quad (4.6)$$

kde τ je normalizované dopravní zpoždění, s,

T_u – doba průtahu, s,

T_n – doba náběhu, s.



Obr. 4.3 – Identifikace parametrů z přechodové charakteristiky (Hlava, 2000)

Pomocí rovnice

$$K = \frac{\Delta y}{\Delta u}, \quad (4.7)$$

kde K je zesílení soustavy,

Δy – změna výstupního signálu,

Δu – změna vstupního signálu,

se vypočítá statické zesílení soustavy. Z těchto tří parametrů se pak pomocí vztahů Zieglera-Nicholse vypočítají parametry regulátoru (Konfršt, 2014).

4.4.1 Aproximace přechodové charakteristiky třibodovou metodou

Jednou z možností, jak lze získat zesílení, časové konstanty a dopravní zpoždění regulované soustavy je aproximace přechodového děje pomocí takzvané třibodové metody. Výsledkem této metody je čtyřparametrový model druhého řádu

$$G(s) = \frac{K}{(T_1s + 1) \cdot (T_2s + 1)} \cdot e^{-T_d s}, \quad (4.8)$$

kde G je přenos soustavy,

K – zesílení soustavy,

T_1 – časová konstanta soustavy, s,

T_2 – časová konstanta soustavy, s,

e – Eulerovo číslo,

T_d – časová konstanta dopravního zpoždění, s (Noskievič, 1999).

Nejprve se stanoví časové konstanty pro 9 %, 26 % a 70 % ustálené hodnoty odezvy soustavy $t_{0,09}$, $t_{0,26}$ a $t_{0,7}$.

Časová konstanta dopravního zpoždění se vypočte dle vztahu

$$T_d = 2 \cdot t_{0,7} - t_{0,26}, \quad (4.9)$$

kde T_d je časová konstanta dopravního zpoždění, s,

$t_{0,7}$ – časová konstanta pro 70 % ustálené hodnoty odezvy soustavy, s,

$t_{0,26}$ – časová konstanta pro 26 % ustálené hodnoty odezvy soustavy, s.

Následně se vypočítají koeficienty B a C dle vzorců

$$B = 0,83 \cdot t_{0,7} - 0,24 \cdot t_{0,26} + 0,48 \cdot t_{0,09} - T_d, \quad (4.10)$$

$$C = 4 \cdot (t_{0,26} - t_{0,09})^2, \quad (4.11)$$

kde B je koeficient pro výpočet časové konstanty, s,

C – koeficient pro výpočet časové konstanty, s,

$t_{0,7}$ – časová konstanta pro 70 % ustálené hodnoty odezvy soustavy, s,

$t_{0,26}$ – časová konstanta pro 26 % ustálené hodnoty odezvy soustavy, s,

$t_{0,09}$ – časová konstanta pro 9 % ustálené hodnoty odezvy soustavy, s,

T_d – časová konstanta dopravního zpoždění, s.

Na konec se pomocí koeficientů B a C vypočítají časové konstanty dle vztahů

$$T_1 = \frac{B + \sqrt{B^2 - 4 \cdot C}}{2}, \quad (4.12)$$

$$T_2 = \frac{B - \sqrt{B^2 - 4 \cdot C}}{2}, \quad (4.13)$$

kde T_1 je časová konstanta soustavy, s,

B – koeficient pro výpočet časové konstanty, s,

C – koeficient pro výpočet časové konstanty, s,

T_2 – časová konstanta soustavy, s.

Zesílení K je vypočteno z rovnice

$$K = \frac{y_{(\infty)}}{u_{(\infty)}}, \quad (4.14)$$

kde K je zesílení soustavy,

$y_{(\infty)}$ – velikost ustáleného výstupního signálu,

$u_{(\infty)}$ – velikost ustáleného vstupního signálu.

4.5 KOMERČNÍ POSTUPY PRO AUTOTUNING

V této kapitole jsou ukázány teoretické postupy, které se dostaly až k praktickému využití některých společností. Jak se ukázalo, postupy, které byly před dvaceti lety považovány za budoucnost, se příliš neujaly. Naproti tomu se rozšířily postupy, které v podstatě napodobují spojitou regulaci.

Firemní postupy automatického nastavení jsou určeny pro různé formy a úpravy PID regulátorů. Často používaný je například sériový tvar PID regulátoru

$$u(t) = r_0 \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right), \quad (4.15)$$

kde u je velikost akční veličiny,

r_0 – hodnota proporcionální složky,

e – regulační odchylka,

T_i – hodnota integrační složky,

T_d – hodnota derivační složky.

To je dáno především historicky z doby pneumatických regulátorů.

V případě použití funkce autotunig je vždy nutné zjistit, pro jaký tvar regulátoru jsou nalezené parametry použitelné. V případě použití jiného tvaru je nutné parametry přepočítat (Klán, 2009).

4.5.1 Foxboro

Společnost Foxboro označuje funkci samočinného nastavení parametrů PID regulátoru jako pre-tuning. V případě aktivace této funkce generuje regulátor skok akční veličiny a zaznamenává přechodový děj, na jehož základě vyhodnocuje tříparametrový model

$$G_s = \frac{K^{-sL}}{1 + sT} \quad (4.16)$$

kde G_s je přenos soustavy,

K – zesílení soustavy,

T – časová konstanta soustavy, s,

L – dopravní zpoždění, s.

Konkrétní parametry PID regulátoru jsou poté vypočítány dle vztahů Zieglera a Nicholse.

V novějších řadách regulátorů se používá čtyřparametrový model pro druhý řád

$$G_s = \frac{K^{-sL_1}}{(1 + sT_1)(1 + sT_2)} \quad (4.17)$$

kde G_s je přenos soustavy,

K – zesílení soustavy,

T_1 – časová konstanta soustavy, s,

T_2 – časová konstanta soustavy, s,

L_1 – časová konstanta dopravního zpoždění, s (Klán, 2009).

4.5.2 ABB

Automatické nastavení regulátorů společnosti ABB je založeno na rozkmitání soustavy pomocí relé ve zpětné vazbě a následné nastavení parametrů PID regulátoru je blízké Ziegler-Nicholsovu nastavení. Pro procesy s velkým dopravním zpožděním je k dispozici ještě jedno mnohem konzervativnější řešení.

V novějších verzích regulátorů je k algoritmu relé ve zpětné vazbě doplněn ještě generátor skokové změny akční veličiny, což umožňuje zjistit statické zesílení soustavy. Nastavení pomocí experimentu s relé tím může být tak vylepšeno bez zásahu uživatele (Klán, 2009).

4.5.3 Yokogawa

Funkce autotune regulátorů firmy Yokogawa využívá tříparametrový model prvního řádu. Rovnice pro výpočet konečných parametrů jsou neveřejné a dle firmy Yokogawa jsou empiricky odvozené, tedy pomocí rozsáhlých simulací.

Pro automatické nastavení parametrů uživatel volí velikost přeregulování při skoku žádané hodnoty dle následující tabulky.

Tab. 4.4 – Přeregulování

Typ	Přeregulování
1	0 %
2	5 %
3	10 %
4	15 %

Zvolení většího přeregulování vede k rychlejšímu náběhu na žádanou hodnotu. Počáteční parametry regulátoru jsou nastaveny defaultně, nebo podle požadavků uživatele.

Výhodou regulátoru je, že stále monitoruje odchylku mezi používaným modelem a skutečným. V případě větší odchylky upozorní uživatele na nutnost vytvoření nového modelu (Klán, 2009).

5 MATEMATICKO-FYZIKÁLNÍ MODEL TOPNÉ SOUSTAVY

Výchozím modelem při tvorbě matematicko-fyzikálního modelu byla představa standardní místnosti tvaru kvádrů s předem známými rozměry. Jedná se o model tepelné soustavy, takže se předpokládá, že teplota okolí místnosti bude nižší než teplota uvnitř místnosti. Za tohoto předpokladu se uvažují tři tepelné zdroje:

1. slunce,
2. otopný systém,
3. lidé v místnosti.

Převážná část energie Země pochází z nitra Slunce. Ta menší část energie pochází ze sluneční mlhoviny, což je velmi stará energie, kterou planeta Země uchovává od doby svého vzniku. Přibližně jedna třetina slunečního záření se odráží z atmosféry zpět do vesmíru. Asi jedna pětina záření je pak pohlcena v atmosféře a jedna polovina je přeměněna na teplo. Díky této přeměně je na Zemi průměrná teplota 15 °C a pro život tak ideální podmínky.

V současnosti se sluneční energie velmi využívá i v běžných domácnostech, například k ohřevu užitkové vody nebo k vytápění. Samostatnou kapitolou je přeměna sluneční energie na elektrickou (Kleczek, 2004).

I prostup sluneční energie do budov není rozhodně zanedbatelný, proto je tento zdroj vytápění zahrnut do modelu a slouží k lepší představivosti pro vliv sluneční energie na budovy. K určení výkonu slunečního záření dopadající kolmo na plochu 1 m slouží tzv. solární jednotka. Střední hodnota solární konstanty je 1 369 W.m⁻². Prostup slunečního záření oknem je okamžitý a má hodnotu přibližně 500 W.m⁻², samozřejmě záleží na aktuální intenzitě záření, na typu průsvitné plochy a na stínícím součiniteli (ostatní budovy, rolety, žaluzie, fólie). Prostup tepla stěnou je zpožděný a vykazuje útlum 5 W.m⁻² (Rubinová, 2003).

Jako hlavní otopný systém je uvažována standardní teplovodní soustava s plynovým kotlem a spotřebiči. Jeden z hlavních důvodů výběru tohoto typu vytápění byla možnost plynulé regulace výkonu. Mnoho plynových kotlů disponuje několika typy regulace.

Pro dosažení co nejpřesnějšího reálného modelu místnosti je důležitý i počet osob, které se v místnosti nachází. Sedící dospělý muž, který sleduje například televizi, vyprodukuje tepelný výkon o hodnotě přibližně 100 W, viz. tab. 5.1 (Centnerová, 2000).

Tab. 5.1 – Hodnoty tepelného výkonu metabolismu (Centnerová, 2000)

Činnost	Tepelný výkon, W
Spaní	70
Odpočinek, ležení v posteli	80
Sezení, relaxace	100
Stání, práce v sedě	120
Velmi lehká práce (nakupování)	160
Lehká práce (domácí práce)	200
Středně těžká práce (tanec)	300
Těžká práce (tenis)	600
Velmi těžká práce (squash)	700

5.1 ZÍSKÁNÍ MATEMATICKO-FYZIKÁLNÍHO MODELU

Sestavení matematicko-fyzikálního modelu topné soustavy vychází z těchto dvou bilančních rovnic

$$P = OK_T(T_T - T) + K_{Tok}(T_T - T_{ok}) + m_T c_T \frac{dT_T}{dt}, \quad (5.1)$$

$$OK_T(T_T - T) = K_{ok}(T - T_{ok}) + mc \frac{dT}{dt}, \quad (5.2)$$

kde P je suma topného výkonu, W,

O – otevření termostatického ventilu radiátoru,

K_T – součinitel prostupu tepla mezi topnou vodou a místností,

K_{ok} – součinitel prostupu tepla mezi místností a okolím (ztráty),

T – teplota v místnosti, °C,

T_{ok} – teplota v okolí místnosti, °C,

m – hmotnost vzduchu v místnosti, kg,

c – měrná tepelná kapacita vzduchu, $\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$,

K_{Tok} – součinitel prostupu tepla mezi topnou vodou a okolím (ztráty),

T_T – teplota topné vody, °C,

m_T – hmotnost vody v radiátoru, kg,

c_T – měrná tepelná kapacita vody, $\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$.

Suma topného výkonu je pouze součet všech tří tepelných zdrojů dle vztahu

$$P = P_S + P_T + P_o, \quad (5.3)$$

kde P_S je prostup tepelného výkonu slunce, W,

P_T – výkon radiátoru v místnosti, W,

P_o – tepelný výkon osob v místnosti, W.

Ze základních bilančních rovnic jsou odvozeny vztahy pro výpočet teploty v místnosti a teploty topné vody v čase

$$\frac{P - OK_T(T_T - T) - K_{Tok}(T_T - T_{ok})}{m_T c_T} = \frac{dT_T}{dt}, \quad (5.4)$$

$$\frac{OK_T(T_T - T) - K_{ok}(T - T_{ok})}{mc} = \frac{dT}{dt}, \quad (5.5)$$

kde P je suma topného výkonu, W,

O – otevření termostatického ventilu radiátoru,

K_T – součinitel prostupu tepla mezi topnou vodou a místností,

K_{ok} – součinitel prostupu tepla mezi místností a okolím (ztráty),

T – teplota v místnosti, °C,

T_{ok} – teplota v okolí místnosti, °C,

m – hmotnost vzduchu v místnosti, kg,

c – měrná tepelná kapacita vzduchu, $\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$,

K_{Tok} – součinitel prostupu tepla mezi topnou vodou a okolím (ztráty),

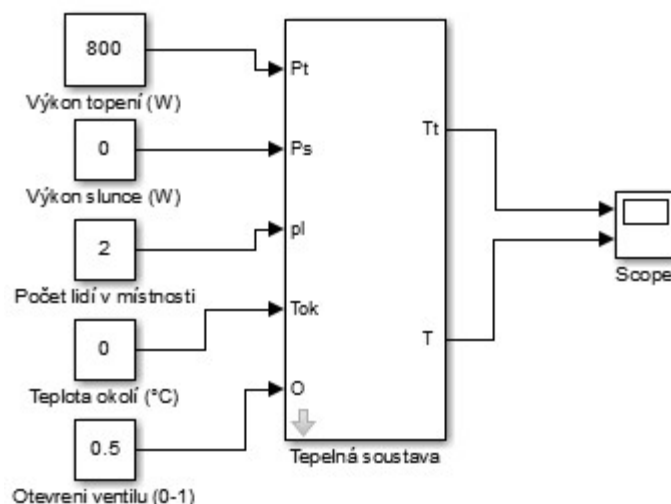
T_T – teplota topné vody, °C,

m_T – hmotnost vody v radiátoru, kg,

c_T – měrná tepelná kapacita vody, $\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$.

5.2 SIMULACE NAVRHNUTÉHO MODELU

Simulace navrženého modelu tepelné soustavy byla provedena v programu Matlab & Simulink. Výsledně odvozené vztahy byly přepsány do programu Simulink, zapojení subsystému je vidět na obr. 5.3.



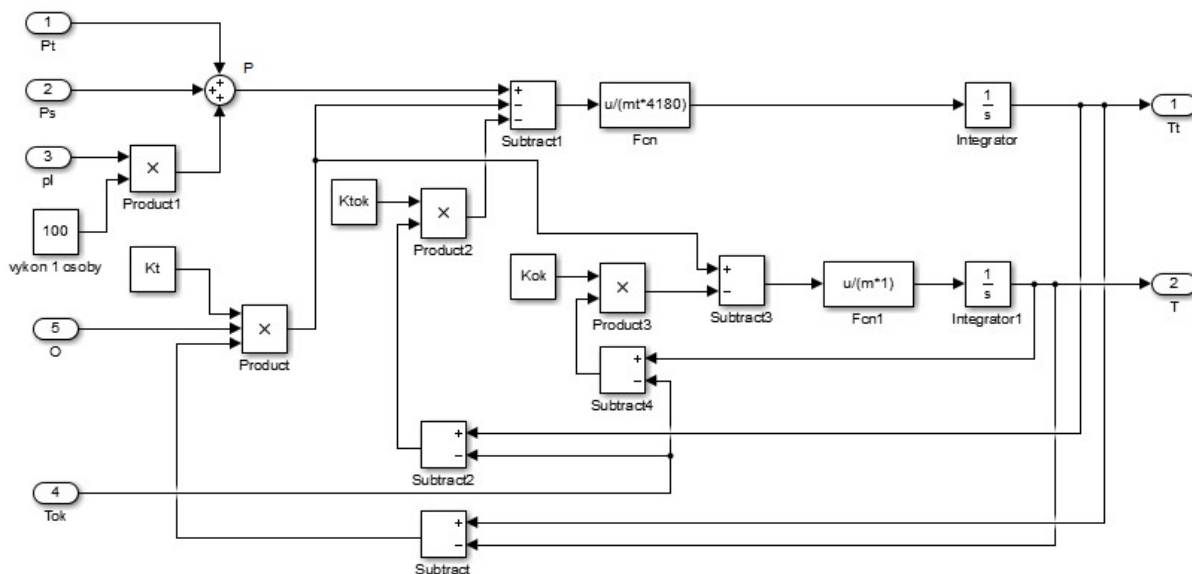
Obr. 5.1 – Subsystem tepelné soustavy

Z obr. 5.1 jsou názorně vidět vstupy a výstupy soustavy, kdy na levé straně vstupují do soustavy dílčí výkon, teplota okolí a úroveň otevření ventilu. Výstupem ze soustavy je teplota topné vody a teplota v místnosti.

Ostatní volitelné parametry jsou zadávány v masce subsystemu, která se nachází na obr. 5.2. Všechny hodnoty koeficientů prostupu tepla se udávají v rozmezí 0 až 1. Objem místnosti se udává v m^3 , který je následně přepočítán na hmotnost vzduchu v místnosti vynásobením konstanty 1,29 kg, což je hmotnost 1 m^3 vzduchu. Všechny teploty jsou udávány ve $^{\circ}C$.

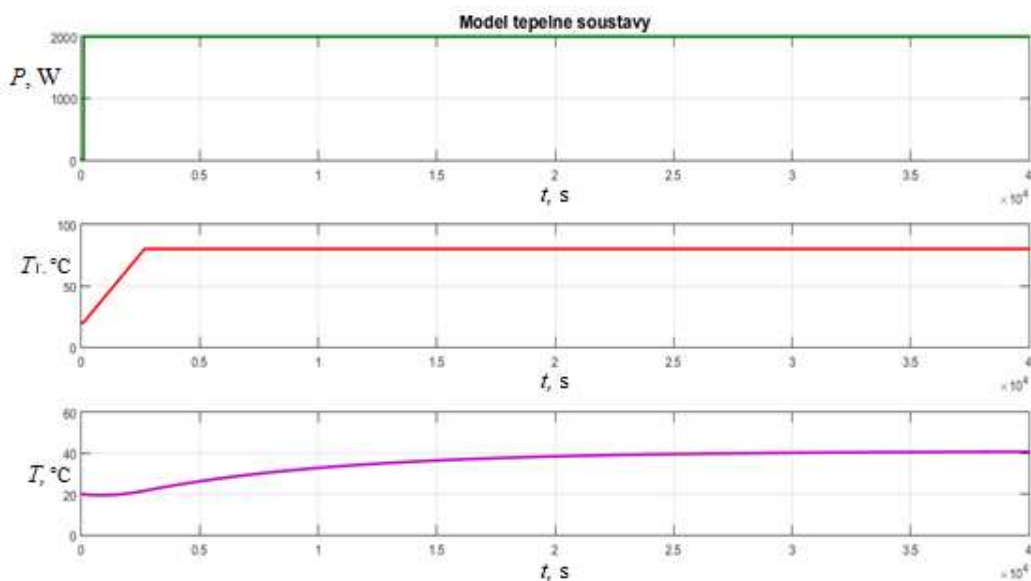
Subsystem (mask)	
Parameters	
Koef. prostupu tepla (topení - místnost)	<input type="text" value="0.0042"/>
Objem místnosti (m3)	<input type="text" value="54"/>
Počáteční teplota v místnosti	<input type="text" value="20"/>
Hmotnost vody v radiátoru	<input type="text" value="20"/>
Počáteční teplota vody	<input type="text" value="20"/>
Koef. prostupu tepla do okolí (ztráty)	<input type="text" value="0.004"/>
Koef. prostupu tepla (topení - okolí)	<input type="text" value="1"/>

Obr. 5.2 – Maska subsystému



Obr. 5.3 – Model tepelné soustavy v programu Simulink

V modelu tepelné soustavy se předpokládá, že osoby, které jsou v místnosti přítomny, jsou v klidu, proto definovaný tepelný výkon je 100 W na jednu osobu. Tento údaj je možné modifikovat dle tab. 5.1.



Obr. 5.4 – Průběh teplot v modelu při sepnutí kotle

Simulace modelu byla provedena pro hodnoty, které jsou vidět v masce subsystému na obr. 5.2. Kotel po 100 s začal topit na výkon 2 kW, poté se začala ohřívat otopná voda, kde je pro reálnost situace nastavena saturace na 80 °C, neboť zatím není připojen žádný regulátor. Z průběhů, které jsou vidět na obr. 5.4 je dále vidět, že při hodnotě 80 °C otopné vody se teplota v místnosti z 20 °C zvýší na 40 °C přibližně za 6 hodin od sepnutí kotle.

6 NÁVRH STRATEGIE ŘÍZENÍ TEPELNÉ SOUSTAVY

Z uvedených strategií řízení tepelných soustav v teoretické části, byla pro regulaci vytvořeného systému zvolena ekvitermní regulace. Hlavním důvodem je aktuálnost této strategie, používá se ve většině otopných soustav v dnešní době. Jedním z hlavních celosvětových témat je dnes úspora energie. V případě vytápění plynovým kotlem se jedná o užití kondenzačních kotlů, jejichž účinnost roste s poklesem teploty otopné vody, což platí i například pro tepelná čerpadla.

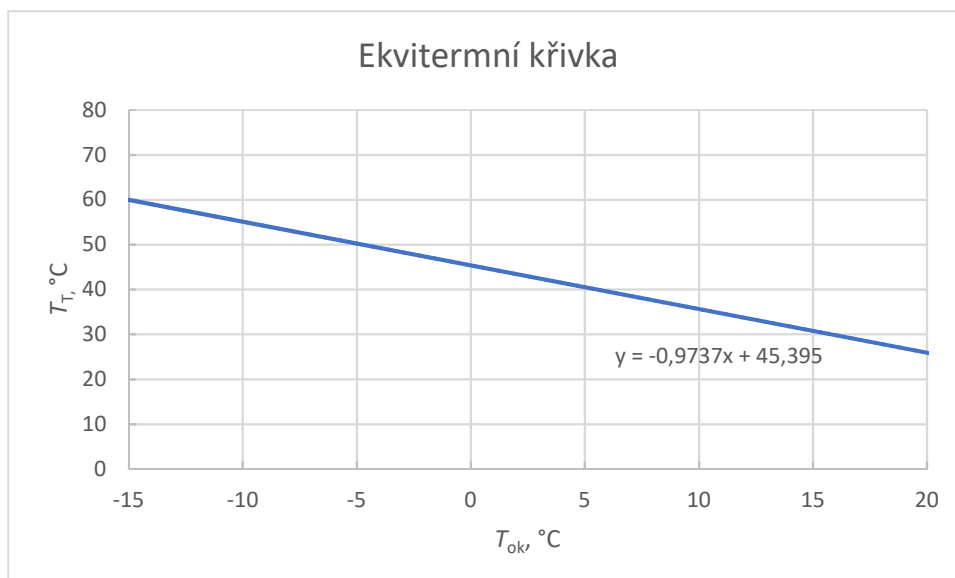
Další výhodou ekvitermní regulace je to, že se dá implementovat jak na malý rodinný dům, tak i na rozsáhlou soustavu centrálního zásobování teplem. Na efektivitu provozu mají vliv nejen specifické vlastnosti zdroje tepla, ale i ztráty, které vznikají na vedení tepla, které ekvitermní regulace též snižuje.

Ekvitermní regulace není samozřejmě zajištěním nulových ztrát, ale je to základ, o který se opírají další technická opatření vedoucí k maximální efektivitě, a tedy k minimální spotřebě energií.

6.1 VOLBA EKVITERMNÍ KŘIVKY

Prvním a důležitým krokem při návrhu ekvitermní regulace je volba ekvitermní křivky. Jedná se o křivku, která popisuje závislost mezi teplotou topné vody a venkovní teplotou, viz. kapitola 2.2.

K výpočtu otopné křivky byla použita zadávací tabulka dle (Hodboď, 2017), která byla následně přepracována v programu Excel, obr. 6.1.

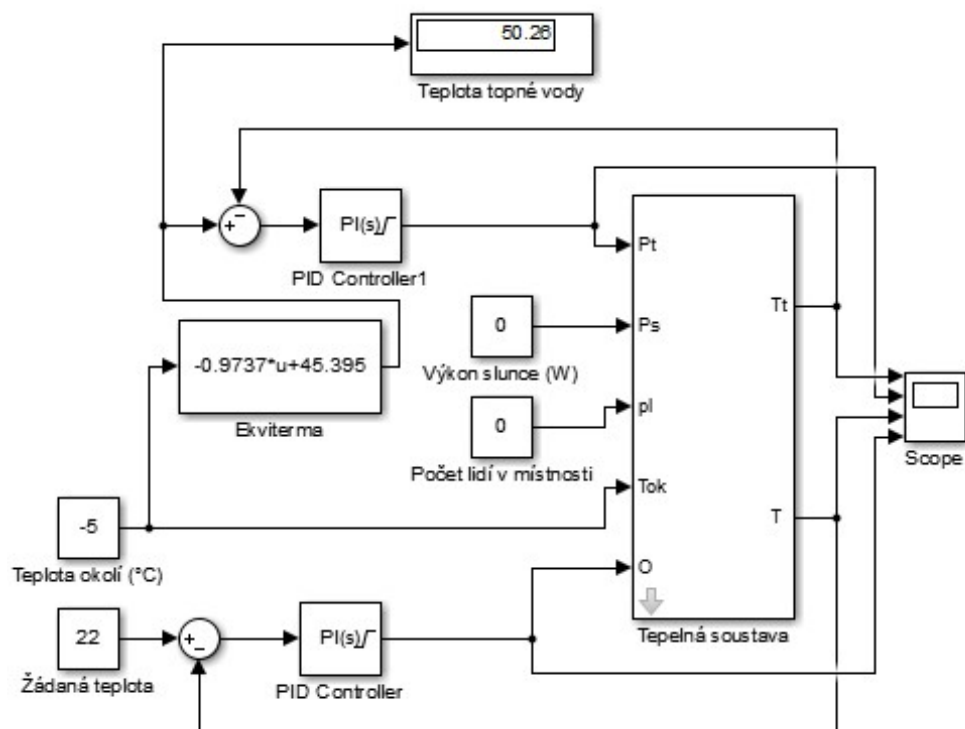


Obr. 6.1 – Ekvitermní křivka pro vytvořený model

6.2 SIMULACE EKVITERMNÍ REGULACE

Simulace byla opět vytvořena v programu Matlab & Simulink. Z obr. 6.2, který představuje schéma simulace regulace tepelné soustavy, pomocí ekvitermní regulace, je vidět, že soustava je řízena dvěma na sobě nezávislými PI regulátory. První PI regulátor řídí akční člen, kterým je v tomto případě plynový kotel. Žádanou veličinou je teplota topné vody, která je vypočítána na základě venkovní teploty, dle předem určené ekvitermní křivky. Je vidět, že pro venkovní teplotu -5 °C, je vypočtena teplota topné vody na $50,26$ °C.

Druhý PI regulátor, reguluje ventil topného tělesa a žádanou hodnotou je přímo požadovaná teplota v místnosti, kterou zadává uživatel. Míra otevření ventilu je udávána v rozsahu 0 % až 100 %.



Obr. 6.2 - Model ekvitermní regulace v programu Simulink

7 POPIS PROGRAMU MERBON IDE

Merbon IDE je vývojové prostředí, které slouží pro regulaci a řízení technologických procesů prostřednictvím regulátorů řady Mark. Jedná se o software, na jehož vývoji se podílejí tři společnosti, Domat Control System s.r.o., Energocentrum plus s.r.o. a Mikroklima s.r.o.

V Merbon IDE lze programovat dvěma způsoby, a to pomocí funkčních bloků (FUPLA) nebo strukturovaným textem (ST) podle normy IEC 61131-3. Programování pomocí funkčních bloků je vhodné při tvorbě méně náročných procesů, pak je programování přehledné a rychlé. V případě rozsáhlých projektů se doporučuje použití spíše strukturovaného textu.

7.1 KOMUNIKAČNÍ PROTOKOLY

Zařízení, které disponují operačním systémem Merbon RT, jsou schopné komunikovat s ostatními zařízeními. Typy komunikace se obecně rozlišují dle typu komunikačního kanálu a typu komunikačního protokolu. V současné době se tyto skupiny vzájemně prolínají. Použití jednotlivých typů kanálů a typů komunikačních protokolů záleží na použité platformě a také samozřejmě na dostupnosti ovladačů ve vývojovém prostředí Merbon IDE. Počet dostupných protokolů a typů kanálů průběžně narůstá, uživatel však není omezen pouze dostupnou nabídkou, ale může si komunikační protokol napsat sám pomocí jazyka ST. V současné době má uživatel na výběr z těchto typů komunikace

1. SSCP,
2. Modbus,
3. M-bus,
4. IEC 62056-21.

K definování komunikace s dalšími zařízeními lze vytvářet komunikační mapy, které lze exportovat.

7.2 TYPY JEDNOTLIVÝCH JAZYKŮ

Programovací jazyky PLC se dělí do dvou základních skupin, textové a grafické. V Merbon IDE má uživatel výběr z obou těchto skupin. Jazyk (ST) je zástupcem textové skupiny. Jedná se o velmi výkonný vyšší programovací jazyk, založený na jazycích Ada, Pascal a C. Obsahuje všechny podstatné prvky moderního programovacího jazyka, včetně větvení a iteračních smyček.

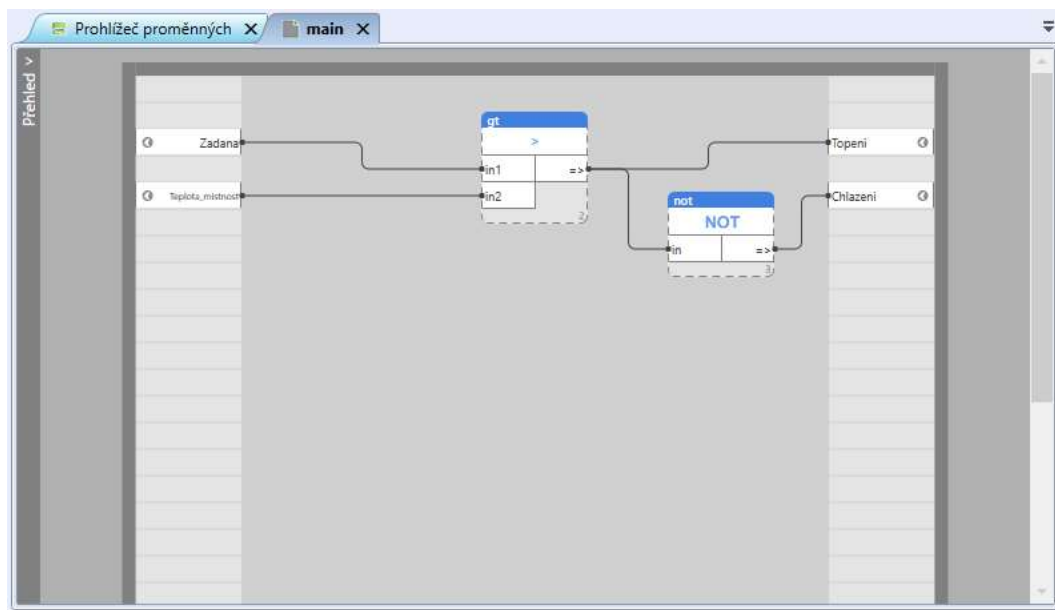
```

1 FUNCTION_BLOCK Teplota
2 (*
3 EXTENDS //base type
4 IMPLEMENTS //interface type list
5 *)
6 VAR
7     (* add local variables here *)
8 END_VAR
9 VAR_INPUT
10     (* add in variables here *)
11     Zadana : REAL;
12     Merena : REAL;
13 END_VAR
14 VAR_OUTPUT
15     (* add out variables here *)
16     Topeni : bool;
17     Chlazení : bool;
18 END_VAR
19 (*
20 METHOD abc //: return type
21 // method's body
22 END_METHOD
23 *)
24 (*function block body*)
25 IF Zadana > Merena THEN Topeni := TRUE;
26 ELSE Chlazení := TRUE;
27 END_IF;
28 END_FUNCTION_BLOCK

```

Obr. 7.1 - Ukázka programu v jazyce ST

Ze skupiny grafických jazyků je to (FBD), který je označován jako (FUPLA). Tento jazyk je velmi blízký procesnímu průmyslu, protože vyjadřuje chování funkcí, funkčních bloků a programů jako soubor vzájemně provázaných funkčních bloků, podobně jako tomu je v elektrických obvodech.

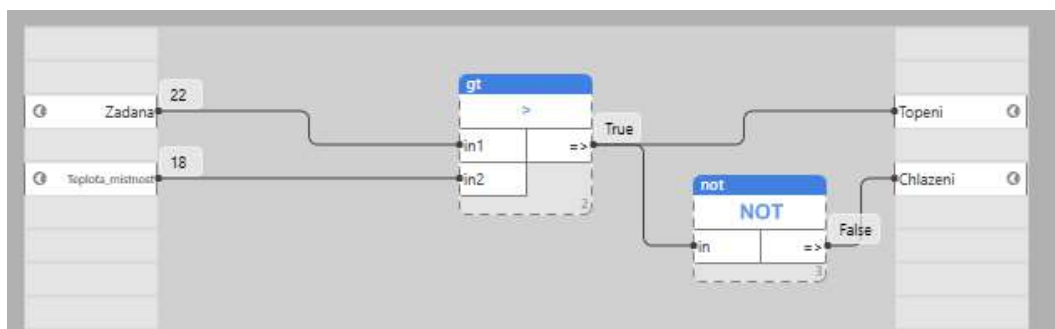


Obr. 7.2 - Ukázka programu v jazyce FUPLA

Volba programovacího jazyka je závislá především na zkušenostech programátora, na typu řešeného problému, na zvyklostech společnosti apod.

7.3 LADĚNÍ PROGRAMU A HLEDÁNÍ CHYB

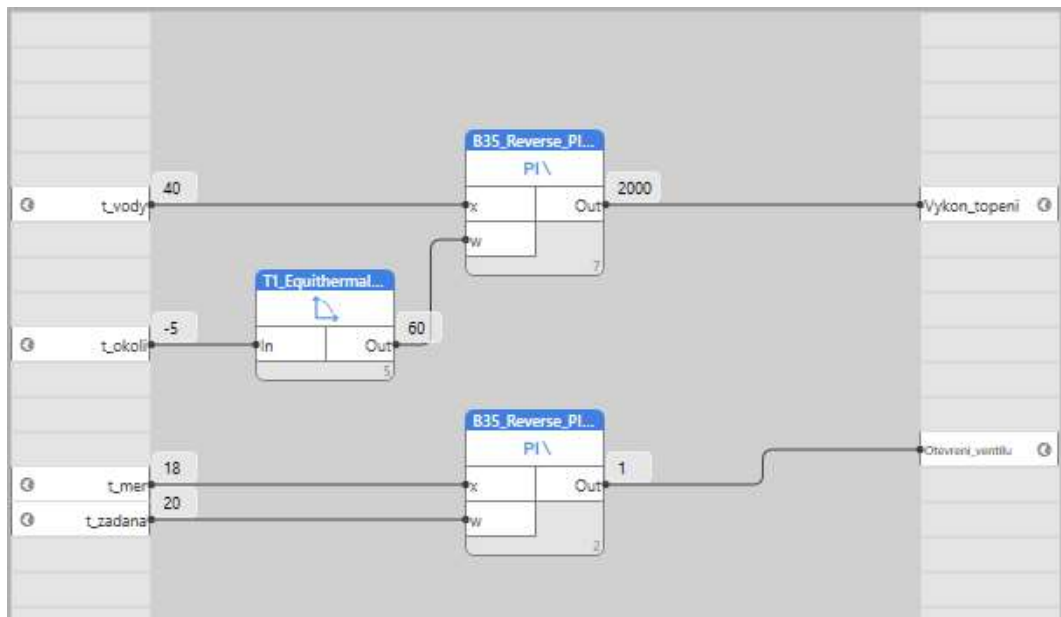
Jednou z velkých předností prostředí Merbon IDE je možnost ladění programu a hledání chyb. Součástí instalačního balíčku Merbon je i Merbon RT, což je program, který se dá označit jako emulátor PLC a uživatel má tak možnost bez připojeného automatu testovat vytvořený algoritmus. Ladění je vidět na obr. 7.3.



Obr. 7.3 - Ukázka ladění programu

8 ALGORITMUS EKVITERMNÍ REGULACE V PROGRAMU MERBON IDE

Vzhledem k tomu, že software Merbon IDE, je určen k regulaci a řízení technologických procesů, tak navrhnout algoritmus ekvitermní regulace nebyl velký problém.



Obr. 8.1 - Ekvitermní regulace v programu Merbon IDE

Na obr. 8.1 je vidět program pro řízení ekvitermní regulace tepelné soustavy. Program obsahuje dva typy bloků:

1. *TI_EquithermalCurve*,
2. *B35_Reverse_PI_Controller*.

Blok 1 zajišťuje výpočet teploty topné vody na základě informace ze senzoru teploty, který by byl reálně umístěn na venkovní fasádě řízené budovy. Výstup tohoto bloku je přiveden do vstupu PI regulátoru, který je označen písmenem w , což v terminologii Merbon označuje žádanou hodnotu. Vstup PI regulátoru označen písmenem x je regulovaná veličina, v tomto případě tedy aktuální teplota topné vody, kterou by měřil příslušný senzor na výstupu kotle. Akční veličinou na výstupu PI regulátoru je výkon kotle.

Druhý PI regulátor reguluje otevření ventilu v místnosti. Vstupem je žádaná teplota, kterou si nastaví uživatel a aktuální teplota v místnosti, která by byla měřena senzorem teploty.

9 AUTOTUNE V PROGRAMU MATLAB

Pro realizaci algoritmu autotune byla vybrána metoda, kde se parametry PID regulátoru vypočítávají na základě znalosti modelu soustavy. Je generována porucha v podobě předem definovaného skoku a zaznamenává se odezva soustavy na generovanou poruchu a na základě této odezvy jsou stanoveny parametry modelu. Pro výběr finálního algoritmu bylo důležité, aby se dal realizovat v jednoduchém PLC pomocí programu Merbon IDE. Vzhledem k dobrým simulačním možnostem programu Matlab a Simulink byl algoritmus nejprve vyzkoušen v tomto programu.

Autotuning se skládá z těchto kroků:

1. regulátor generuje skokovou změnu o předem zvolené velikosti vzhledem k soustavě,
2. odezva na skokovou změnu je zaznamenána do vektorů a vyhodnocena,
3. regulátor vypočte parametry PID regulátoru.

Přechodová charakteristika byla simulována v programu Simulink a data načtena do *Workspace* programu Matlab. V první fázi byla získaná data rozdělena do polí t , u a y . Aproximace odezvy byla provedena pomocí tříbodové metody. Nejprve bylo vypočteno zesílení soustavy pomocí vztahu

$$Z = \frac{y_{(\infty)}}{u_{(\infty)}}, \quad (9.1)$$

kde K je zesílení soustavy,

$y_{(\infty)}$ – velikost ustáleného výstupního signálu,

$u_{(\infty)}$ – velikost ustáleného vstupního signálu.

Následně bylo potřeba stanovit časové konstanty pro 9 %, 26 % a 70% ustálené hodnoty odezvy systému. Pro výpočet časové konstanty dopravního zpoždění se použije vztah

$$T_d = 2 \cdot t_{0,7} - t_{0,26}, \quad (9.2)$$

kde T_d je časová konstanta dopravního zpoždění, s,

$t_{0,7}$ – časová konstanta pro 70 % ustálené hodnoty odezvy soustavy, s,

$t_{0,26}$ – časová konstanta pro 26 % ustálené hodnoty odezvy soustavy, s.

Dále se vypočítaly koeficienty B a C dle vzorců

$$B = 0,83 \cdot t_{0,7} - 0,24 \cdot t_{0,26} + 0,48 \cdot t_{0,09} - T_d, \quad (9.3)$$

$$C = 4 \cdot (t_{0,26} - t_{0,09})^2, \quad (9.4)$$

kde B – je koeficient pro výpočet časové konstanty, s,

C – koeficient pro výpočet časové konstanty, s,

$t_{0,7}$ – časová konstanta pro 70 % ustálené hodnoty odezvy soustavy, s,

$t_{0,26}$ – časová konstanta pro 26 % ustálené hodnoty odezvy soustavy, s,

$t_{0,09}$ – časová konstanta pro 9 % ustálené hodnoty odezvy soustavy, s,

T_d – časová konstanta dopravního zpoždění, s.

Posledním krokem bylo vypočítání již samotných časových konstant T_1 a T_2 dle vztahů

$$T_1 = \frac{B + \sqrt{B^2 - 4 \cdot C}}{2}, \quad (9.5)$$

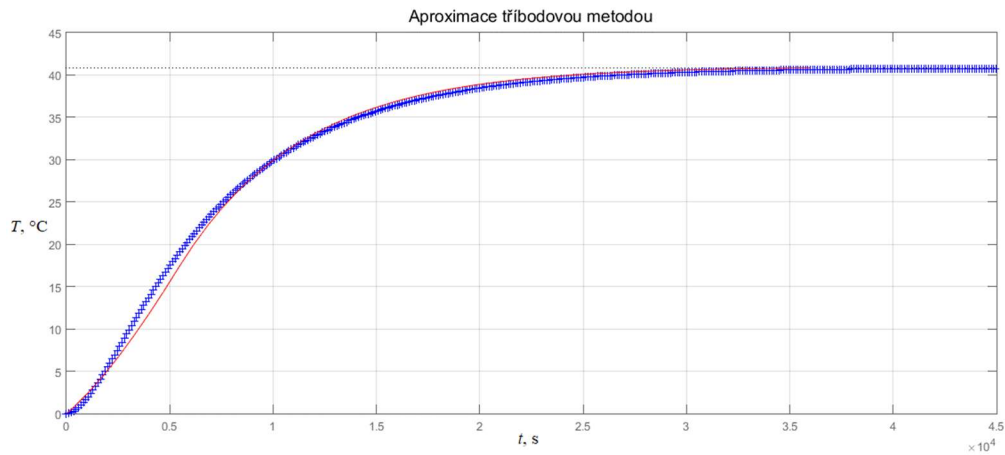
$$T_2 = \frac{B - \sqrt{B^2 - 4 \cdot C}}{2}, \quad (9.6)$$

kde T_1 – je časová konstanta soustavy, s,

B – koeficient pro výpočet časové konstanty, s,

C – koeficient pro výpočet časové konstanty, s,

T_2 – časová konstanta soustavy, s.



Obr. 9.1 - Příklad aproximace třibodovou metodou

Je důležité, že celý postup aproximace je založen na numerických výpočtech, a proto je možné ho použít a realizovat v běžných PLC.

```

%Načtení dat z přechodové charakteristiky
t = tay.time;
y = tay.data;
u = skok.data;

%Identifikace soustavy pomocí třibodové metody
%Určení ustálené hodnoty
Z = y(length(y));
i = length(y);

%Výpočet t1(9%)
yt1 = (0.09*Z);
j = Hledejindex(y,yt1,1,i);
t1=t(j);

%Výpočet t2(26%)
yt2 = (0.26*Z);
j = Hledejindex(y,yt2,1,i);
t2=t(j);

%Výpočet t3(70%)
yt3 = (0.7*Z);
j = Hledejindex(y,yt3,1,i);
t3=t(j);

```

Obr. 9.2 - Aproximace pomocí třibodové metody v programu Matlab


```

%Výpočet parametrů T1 a T2
Td = 2*t1-t2;
B = 0.83*t3-0.24*t2+0.48*t1-Td;
C = 4*(t2-t1)^2;
T1 = (B+sqrt(B^2-4*C))/2;
T2 = (B-sqrt(B^2-4*C))/2;

```

Obr. 9.3 - Výpočet parametrů T1 a T2 v programu Matlab

K určení časových konstant pro 9 %, 26 % a 70 % ustálené hodnoty odezvy systému, byla vytvořena funkce *Hledejindex*. Jedná se o rekurzivní funkci, která pomocí metody půlení intervalu najde v zadaném seříděném poli hledané nebo nejbližší číslo a vrátí jeho index. Vstupem této funkce je tedy pole čísel, ve kterém se má hledat, hledaná hodnota a interval, ve kterém se má hledaná hodnota nacházet.

Metoda půlení intervalu je založená na porovnání hledaného čísla s číslem ve středu intervalu. V případě, že se hodnoty rovnají, funkce vrátí jeho index. Pokud se nerovnají, změní se interval hledání na *a* až prostřední prvek pole, nebo prostřední prvek pole až *b*.

```

function k=Hledejindex(seznam,hodnota,leva,prava)

stred = fix((prava+leva)/2);

if prava-leva <= 1
    rozdil1 = abs(hodnota-seznam(prava));
    rozdil2 = abs(hodnota-seznam(leva));
    if rozdil1 < rozdil2
        k = prava;
        return
    else
        k = leva;
        return
    end
end
if hodnota < seznam(stred)
    k=Hledejindex(seznam,hodnota,leva,stred-1);
else
    k=Hledejindex(seznam,hodnota,stred+1,prava);
end
end

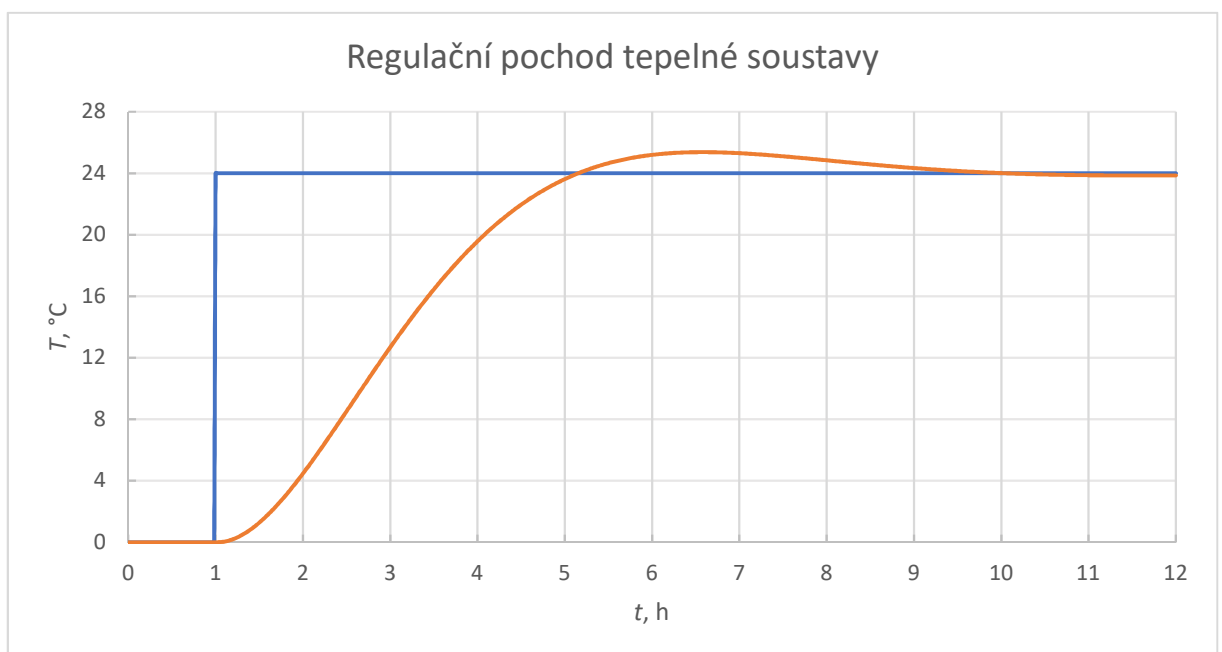
```

Obr. 9.4 - Funkce *Hledejindex* v programu Matlab

Výpočet parametrů PID regulátoru byl proveden metodou výpočtu optimálního modulu dle tab. 4.2. Z této tabulky je patrné, že pro aproximovaný přenos soustavou druhého řádu je k regulaci zvolen regulátor pouze s proporcionální a integrální složkou.

```
%Výpočet parametrů PI regulátoru optimální modul  
Z = Z/u(length(u));  
tau = T2/T1;  
P = (tau^2+1)/(2*Z*tau);  
I = 1/(P*2*Z*T1*((tau*(1+tau))/(tau^2+tau+1)));
```

Obr. 9.5 - Výpočet parametrů PI regulátoru v programu Matlab



Obr. 9.6 - Regulační pochod tepelné soustavy

10 AUTOTUNE V PROGRAMU MERBON IDE

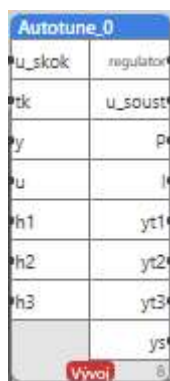
Realizace bloku regulátoru s možností funkce autotuning v programu Merbon IDE je založena na stejných základech jako autotuning v kapitole 9. Pro odlišnost vývojových prostředí, a tedy i programovacích jazyků, je provedení odlišné. Skládá se z těchto hlavních částí:

1. funkční blok s názvem Autotune,
2. funkční blok s názvem Hledejindex,
3. funkční blok s názvem Autotuning,
4. funkční blok s názvem PI_Autotuning,
5. funkční blok s názvem Soustava2,
6. hlavní program s názvem Main2.

10.1 FUNKČNÍ BLOK AUTOTUNE

Tento funkční blok je základním kamenem celého algoritmu samočinného nastavení. Pro přehlednost je napsán v programovacím jazyku ST, výsledná podoba v grafickém jazyku FBD je vidět na obr. 10.1.

Blok na základě skokové změny akční veličiny a výstupu soustavy vypočítává velikost proporcionální a integrační složky regulátoru pro regulaci dané soustavy.



Obr. 10.1 - Funkční blok Autotune

Tab. 10.1 - Přehled vstupů funkčního bloku Autotune

Vstupy		
Vstup	Typ	Význam
<i>u_skok</i>	real	velikost akční veličiny pro funkci autotuning
<i>tk</i>	int	počet vzorků do ustálení regulované veličiny
<i>y</i>	real	regulovaná veličina
<i>u</i>	real	akční veličina
<i>h1</i>	int	index hledané hodnoty <i>t1</i>
<i>h2</i>	int	index hledané hodnoty <i>t2</i>
<i>h3</i>	int	index hledané hodnoty <i>t3</i>

Tab. 10.2 - Přehled výstupů funkčního bloku Autotuning

Výstupy		
Výstup	Typ	Význam
<i>regulator</i>	bool	povolení regulátoru
<i>u_soust</i>	real	akční veličina pro funkci autotuning
<i>P</i>	real	velikost proporcionální složky
<i>I</i>	real	velikost integrační složky
<i>yt1</i>	real	hledaná hodnota <i>t1</i>
<i>yt2</i>	real	hledaná hodnota <i>t2</i>
<i>yt3</i>	real	hledaná hodnota <i>t3</i>
<i>y_s</i>	array	hodnoty regulované veličiny

Funkční blok nejprve vytvoří skokovou změnu, kterou definuje uživatel na základě základních předpokladů o soustavě, a zaznamená odezvu do pole. Pro určení časových konstant pro 9 %, 26 % a 70 % ustálené hodnoty odezvy systému byl obdobně jako v programu Matlab vytvořen funkční blok s názvem Hledejindex, viz. kapitola 10.1.1. Výpočet výsledných parametrů je proveden stejným postupem jako v programu Matlab.

10.1.1 Funkční blok Hledejindex

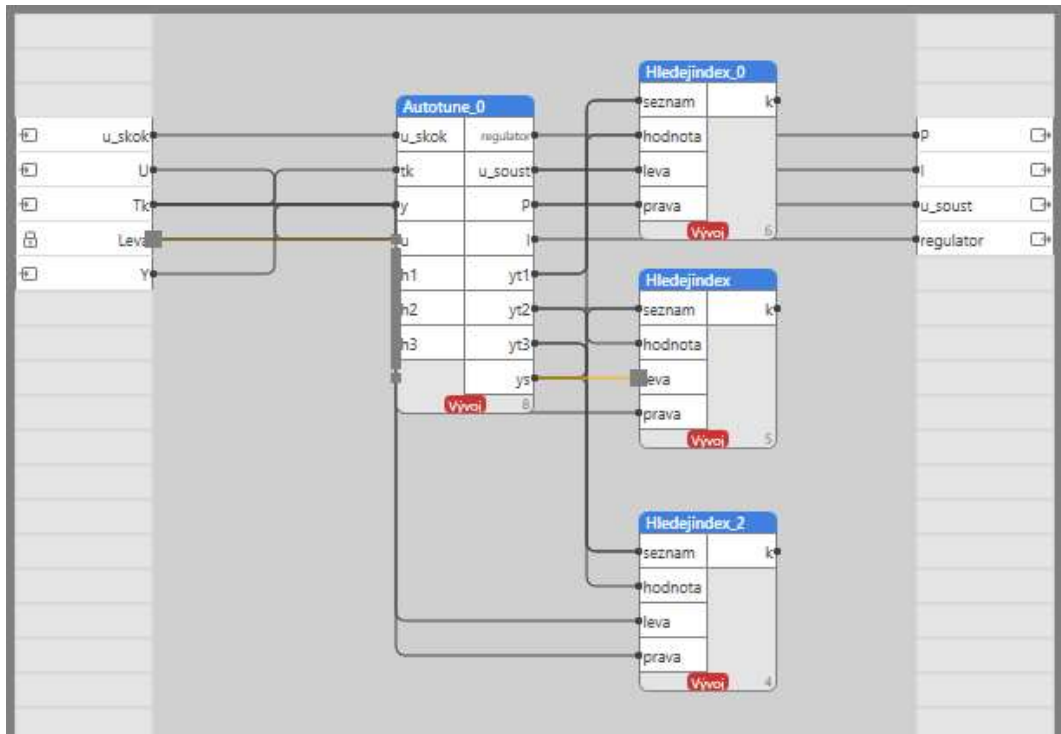
Vzhledem k tomu, že jazyk ST nepodporuje rekurzivní funkce, bylo nutné tuto funkci upravit a rekurzivní volání vyřešit jiným způsobem. Na obr. 10.2. je vidět tělo funkčního bloku

Hledejindex. Jedná se opět o metodu půlení intervalu, která je uzpůsobena pro programovací jazyk ST.

```
20 WHILE leva <= prava DO
21   sred := (prava+leva)/2;
22
23 IF prava-leva <= 1 THEN
24   rozdil1 := abs(hodnota-seznam[prava]);
25   rozdil2 := abs(hodnota-seznam[leva]);
26   IF rozdil1 < rozdil2 THEN
27     k := prava;
28     RETURN;
29   ELSE
30     k := leva;
31     RETURN;
32   END_IF;
33 END_IF;
34 IF hodnota < seznam[sred] THEN
35   prava := sred;
36 ELSE
37   leva := sred;
38 END_IF;
39 END_WHILE;
40
41 END_FUNCTION_BLOCK
```

Obr. 10.2 - Tělo funkčního bloku Hledejindex

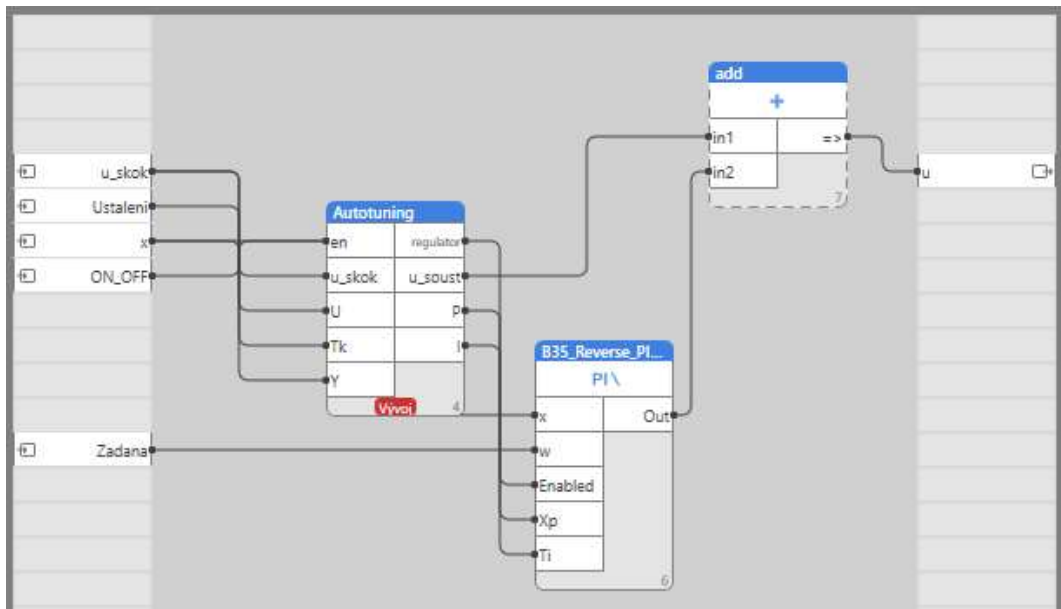
Součástí funkčního bloku Hledejindex je ve své podstatě i funkční blok Autotuning, který nahrazuje rekurzivní volání a je realizován v jazyce FBD. Provedení je vidět na obr. 10.3. Funkční blok Autotuning je tedy schopen samostatně identifikovat soustavu a navrhnout parametry pro regulátor.



Obr. 10.3 - Funkční blok Autotuning

10.2 FUNKČNÍ BLOK PI_AUTOTUNING

V tomto funkčním bloku je spojen funkční blok Autotuning a PI regulátor. Lze tedy říci, že výsledkem je PI regulátor s funkcí autotuning.



Obr. 10.4 - Funkční blok PI_Autotuning

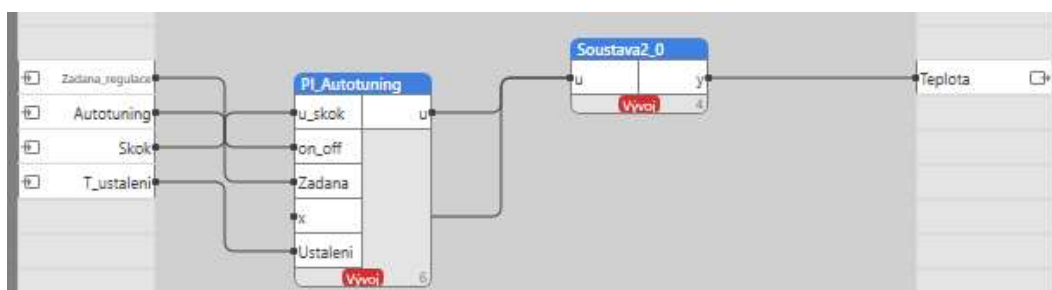
Tab. 10.3 - Přehled vstupů funkčního bloku PI regulátoru

Vstupy PI regulátoru		
Vstup	Typ	Význam
x	real	řízená hodnota
w	real	žádaná hodnota
<i>Enable</i>	bool	povolení činnosti
X_p	real	velikost proporcionální složky
T_i	real	velikost integrační složky

10.3 HLAVNÍ PROGRAM

Hlavní program s názvem Main2, by mohl být v reálném případě nahrán do PLC, které by mělo zajišťovat regulaci příslušné soustavy. Vstupy a výstupy programu by musely být ovšem navázány na konkrétní proměnné.

Součástí hlavního programu je funkční blok s názvem Soustava2_0. Jedná se o simulátor reálné soustavy, pomocí kterého je možné vyzkoušet funkci autotuning, viz. kapitola 10.3.1.



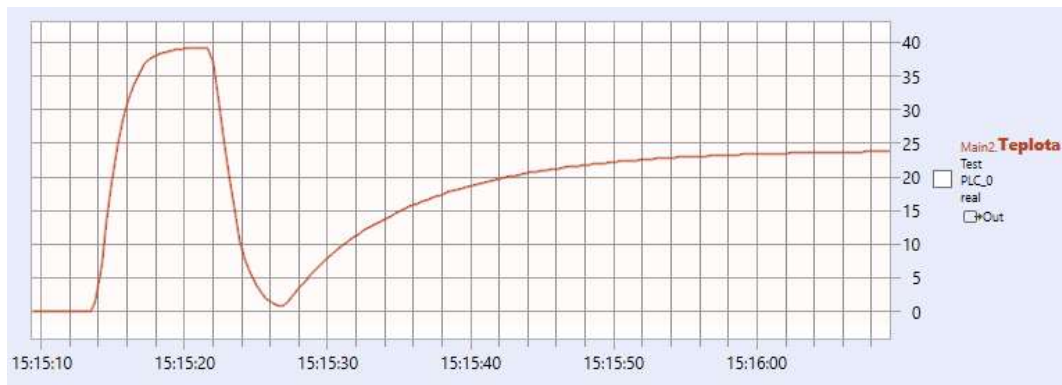
Obr. 10.5 - Hlavní program s modelem tepelné soustavy

Na obr. 10.5 je vidět hlavní program, pomocí kterého proběhlo ověření funkčnosti navrhnutého algoritmu v prostřední Merbon IDE.

Tab. 10.4 - Popis vstupů hlavního programu

Vstupy		
Vstup	Typ	Význam
<i>Zadana_regulace</i>	real	žádaná hodnota (teplota)
<i>Autotuning</i>	bool	zapnutí / vypnutí funkce autotuning
<i>Skok</i>	real	hodnota akční veličiny při funkci autotuning
<i>T_ustaleni</i>	int	předpokládaný počet vzorků do ustálení měřené hodnoty

Na základě tab. 10.4 operátor nastaví požadované hodnoty vstupů a spustí funkci Autotuning. Po identifikaci soustavy a výpočtu parametrů, se automaticky aktivuje PI regulátor s vypočtenými parametry.

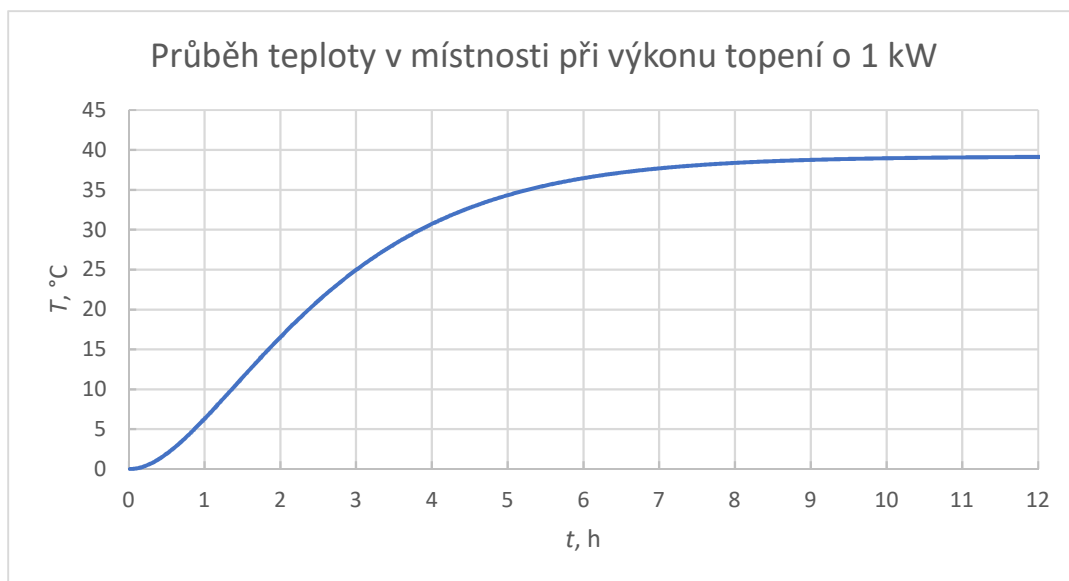


Obr. 10.6 - Průběh výstupní teploty při sepnutí funkce autotuning z Merbon IDE

Na obr. 10.6 je vidět průběh výstupu soustavy při aktivaci funkce autotuning. Nejprve se identifikuje soustava a poté je aktivován PI regulátor s nastavenou žádanou hodnotou 24 °C.

10.3.1 Tepelná soustava v Merbon IDE

Pomocí identifikace soustavy v programu Matlab a převedení spojitého přenosu soustavy na diskrétní byla vytvořena soustava v prostředí Merbon IDE, která slouží k otestování funkce PI_Autotuning. Na obr. 10.7 je vidět průběh teploty v místnosti, kterou počítá funkční blok při vstupu výkonu o velikosti 1 kW.



Obr. 10.7 - Průběh teploty v místnosti při výkonu topení o 1 kW

Základem funkčního bloku je diferenční rovnice

$$y = -a_1y(k - 1) - a_2y(k - 2) + b_1u(k - 1) + b_2u(k - 2), \quad (10.1)$$

kde y je výstup soustavy,

a – konstanty soustavy,

b – konstanty soustavy,

k – počet kroků.

Výsledné provedení funkčního bloku je vidět na obr. 10.8.

```

7      (* add local variables here *)
8      a1 : REAL := -1.9759500529;
9      a2 : REAL := 0.9760946270;
10     b1 : REAL := 0.0000028449841;
11     b2 : REAL := 0.0000028221308;
12     y1 : REAL;
13     y2 : REAL;
14     u1 : REAL;
15     u2 : REAL;
16     index : DINT := 0;
17     END_VAR
18     VAR_INPUT
19         (* add in variables here *)
20         u : REAL;
21     END_VAR
22     VAR_OUTPUT
23         (* add out variables here *)
24         y : REAL;
25     END_VAR
26     y := -a1*y1-a2*y2+b1*u1+b2*u2;
27     y2 := y1;
28     y1 := y;
29     u2 := u1;
30     u1 := u;

```

Obr. 10.8 - Ukázka funkčního bloku simulátoru soustavy

11 ZHODNOCENÍ

Nejprve se pomocí bilančních rovnic vytvořil matematicko-fyzikální model topné soustavy v programu Matlab a Simulink. Tento model by bylo potřeba v ideálním případě porovnat s reálnými daty, které bohužel nebyly k dispozici. Poté by se dali přesně určit konstanty všech postupů tepla a model by byl mnohem přesnější. I bez tohoto porovnání se však modelové závislosti blíží realitě.

Jako optimální strategie řízení tepelné soustavy byla zvolena ekvitermní regulace z důvodů jednoduchosti, kvality a v případě reálného použití úspory energie. Tato strategie byla vyzkoušena v programu Matlab a Simulink. Poté byl tento algoritmus řízení převeden do programu Merbon IDE.

Vzhledem k tomu, že v dnešní době je v 95 % regulačních obvodů použit PID regulátor s vypnutou derivační složkou, tak i v tomto případě bylo pro vybranou metodu nastavení vhodné použít k regulaci soustavy pouze PI regulátor. Proto funkce samočinného nastavení PID regulátoru vypočítává pouze velikost proporcionální a integrační složky.

V programu Merbon IDE byl tedy vytvořen funkční blok PI regulátoru s možností samočinného nastavení a vyzkoušen pomocí vytvořeného simulátoru soustavy. Funkce Autotuning nalezne parametry PI regulátoru a ten následně převezme regulaci soustavy.

Použitelnost zvoleného autotuningového algoritmu má v současné době dvě úskalí. Operátor, který provádí spuštění této funkce musí mít teoretické předpoklady o znalosti soustavy, aby vhodně nastavil velikost akční veličiny a odhadl dobu ustálení regulované veličiny. Nevýhodou je tak celková doba výpočtu parametrů, kdy se musí čekat do ustálení regulované veličiny.

Tento algoritmus by se dal vylepšit o funkci, pomocí které by regulátor sám rozpoznal, že se regulovaná veličina ustálila, pak by operátor zadával pouze velikost akční veličiny před spuštěním autotuningové funkce.

12 ZÁVĚR

V práci byl nejprve vytvořen matematicko-fyzikální model, který simuluje chování tepelné soustavy pro definovanou místnost. Pro řízení navržené soustavy byla zvolena ekvitermní strategie řízení. V této strategii byly použity dva PI regulátory, které regulovali, na základě vypočítané žádané teploty topné vody, výkon kotle. Další akční veličinou pro regulaci teploty v místnosti bylo otevření ventilu topného tělesa. Navržená strategie ekvitermního řízení je funkční a odpovídá dnes běžně používaným způsobům regulace vytápění v soukromých i veřejných objektech.

V prostředí Merbon IDE byl vytvořen funkční blok PI regulátoru, který disponuje navrženou autotuningovou funkcí. Tato funkce dokáže po zadání velikosti akční veličiny a předpokládaným počtem vzorků do ustálení samostatně identifikovat danou tepelnou soustavu a napočítat parametry regulátoru. Funkční blok byl testován v simulaci.

V současné době se nepředpokládá hromadná náhrada PID regulátorů, takže vývoj metod založených na modelu soustavy a autotuningových metod je stále atraktivní.

POUŽITÁ LITERATURA

- BAŠTA, J. 2007. *Možnosti moderních způsobů regulace* [online]. Praha, 17.9.2007 [cit. 2018-07-21]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/mereni-a-regulace/4360-moznosti-modernich-zpusobu-regulace>
- BRIS, R. 2014. *Modely a modelování* [online]. [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~bri10/Teaching/Statistika%20II/skriptum/1_Modely_a_modelovani.PDF
- CENTNEROVÁ, L. 2000. *Tepelná pohoda a nepohoda* [online]. [cit. 2019-01-05]. Dostupné z: <https://vetrani.tzb-info.cz/vnitri-prostredi/404-tepelna-pohoda-a-nepohoda>
- HLAVA, J. 2000. *Prostředky automatického řízení II: analogové a číslicové regulátory, elektrické pohony, průmyslové komunikační systémy*. Vyd. 1. Praha: ČVUT, Strojní fakulta, 160 s. ISBN 80-01-02221-8
- HODBOŮ J. 2017. *Ekvitermní křivky* [online]. 2017 [cit. 2019-01-21]. ISSN 1801-4399. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/mereni-a-regulace/15462-vypocet-a-graf-ekvitermni-krivky>
- KADLEC, K.; KMÍNEK, M.; 2005. *Měřicí a řídicí technika* [online]. [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: <http://uprt.vscht.cz/kminekm/mrt/F2/F2k21-mod.htm>
- KLÁN, P. 2009. *Komerčně využívané pokročilé metody nastavování PID regulátorů* [online]. Praha: Ústav informatiky AVČR, 2009 [cit. 2019-01-03]. Dostupné z: <http://www1.fs.cvut.cz/cz/u12110/pps/test/automa09.pdf>
- KLECZEK, J. 2004. *Slunce a jeho energie* [online]. [cit. 2019-01-05]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/teorie-obnovitelna-energie/1948-slunce-a-jeho-energie>
- KONFRŠT, P. 2014. *Metody samočinného nastavování PID regulátorů*. Pardubice. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice, Fakulta elektrotechniky a informatiky.
- Nespojitě regulátory, 2019. *SŠ-COPT Kroměříž* [online]. Kroměříž: Střední škola - Centrum odborné přípravy technické [cit. 2019-01-02]. Dostupné z: <https://coptkm.cz/portal/reposit.php?action=0&id=22538&revision=-1&instance=2>
- NOSKIEVIČ, P. 1999. *Modelování a identifikace systémů* [online]. Ostrava: Montanex, [cit. 2019-04-30]. ISBN 80-722-5030-2.
- RUBINOVÁ, O. 2003. *Působení slunce na budovu. Olga a Aleš Rubinovi* [online]. Brno, [cit. 2019-01-05]. Dostupné z: <https://www.fce.vutbr.cz/TZB/rubinova.o/prednasky/tp01.pdf>
- Ústav počítačové a řídicí techniky, 2013 [online]. Praha: Ústav počítačové a řídicí techniky VŠCHT Praha, [cit. 2019-01-02]. Dostupné z: <http://uprt.vscht.cz/kminekm/mrt/F3/F3k36-dvrg.htm>
- VOGELEI, K.; BARTOŠÍK, P. 2004. *Optimalizace nastavení PID regulátorů v praxi*. Automa: Časopis pro automatizační techniku [online]. [cit. 2018-04-04]. Dostupné z: http://www.automa.cz/cz/casopis-clanky/optimalizace-nastaveni-pid-regulatoru-v-praxi-2005_01_30257_1607/

Přílohy

A – CD

Příloha k diplomové práci

Modelování, identifikace a řízení topné soustavy

Bc. Martin Šácha

CD

Obsah

- 1 Text diplomové práce ve formátu PDF.
- 2 Vytvořená tepelná soustava v programu Matlab a Simulink.
- 3 Schéma ekvitermní regulace v programu Matlab a Simulink.
- 4 Autotuningový algoritmus v programu Matlab a Simulink.
- 5 Ekvitermní regulace v programu Merbon IDE.
- 6 Autotuningová metoda v programu Merbon IDE.