

**Západočeská univerzita v Plzni  
Fakulta aplikovaných věd  
Katedra kybernetiky**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**PLZEŇ, 2014**

**MICHAL BUGOŠ**

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Bc. Michal BUGOŠ  
Osobní číslo: A12N0156P  
Studijní program: N3918 Aplikované vědy a informatika  
Studijní obor: Kybernetika a řídicí technika  
Název tématu: Pokročilé řízení kaskády kotlů  
Zadávací katedra: Katedra kybernetiky

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


1. Seznamte se se základními technikami používanými v regulaci vytápění, viz např. [1], [3].
2. Seznamte se s problematikou řízení vytápění, ventilace a klimatizace (HVAC), viz např. [2].
3. Seznamte se s řídicím systémem REX [4] a jeho bloky pro průmyslovou regulaci.
4. Navrhněte pokročilé algoritmy pro řízení kaskády kotlů.
5. Ověřte navržené algoritmy řízení na modelu získaném z dlouhodobých dat z alespoň jedné kotelny.
6. Pokud to bude možné, ověřte navržené algoritmy v reálném provozu.

Rozsah grafických prací: dle potřeby  
Rozsah pracovní zprávy: 35-50 stránek A4  
Forma zpracování diplomové práce: tištěná  
Seznam odborné literatury:


- [1] Bašta, J.: Regulace vytápění. Vydavatelství ČVUT, Praha, 2002.
- [2] Haines, R.W.; Hittle, D.C.: Controls systems for heating, ventilating, and air conditioning. Springer Science+Business Media, Inc., New York, 2006.
- [3] Siemens Switzeland Ltd: Control of heating plants. 2004.
- [4] REX Controls: Funkční bloky systému REX, Referenční příručka. Plzeň, 2013.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Pavel Balda, Ph.D.  
Katedra kybernetiky

Datum zadání diplomové práce: 23. září 2013  
Termín odevzdání diplomové práce: 16. května 2014

  
Doc. Ing. František Vávra, CSc.  
děkan



  
Prof. Ing. Josef Psutká, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 23. září 2013

## Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci zpracovanou na závěr studia na Fakultě aplikovaných věd Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně a výhradně s použitím odborné literatury a pramenů, jejichž úplný seznam je její součástí.

V Plzni dne \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
podpis

## Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucímu diplomové práce Ing. Pavlu Baldovi, Ph.D. za čas, který mi věnoval při zpracování této práce a poskytnutí poučných rad.

Slova díky směřuji i ke své rodině za podporu a vytvoření výborných podmínek v průběhu vypracování této práce.

Tato práce byla podpořena Technologickou agenturou ČR, projekt č. TA02010379, "Výzkum a vývoj řídicího systému pro vestavné řízení na bázi nových výkonných mikrokontrolérů".

## Abstrakt

Tato diplomové práce se zabývá návrhem algoritmu řízení kaskády kotlů. Shrnuje základní informace o způsobech řízení vytápění, ventilace a klimatizace (HVAC), obzvláště pak o způsobech regulace zdrojů tepla a řízení jejich kaskád. Při návrhu je nejprve odvozen matematický model identifikací systému z naměřených dat reálné kotelny. Využita je přechodové analýza a metoda nejmenších čtverců. V rámci tvorby modelu byl diskutován vliv zátěže systému. K tomuto modelu je následně, pomocí bloků řídicího systému REX, sestaven řídicí systém složený z PI regulátoru a automatu pro sekvenční řízení spínání jednotlivých kotlů kaskády. V závěru byl řídicí systém ověřen simulací pro různé hodnoty zátěže otopné soustavy.

## Klíčová slova

HVAC, vytápění, regulace, kotel, spínací poměr, kaskáda kotlů, kriteria spínání kotlů, identifikace systémů, FIT, MRE, zátěž, PI regulace, konečný automat, řídicí systém REX



## **Abstract**

This master thesis deals with design of sequence controller of boilers. Summarizes information about control systems for HVAC (Heating, ventilating and air-conditioning), especially about control of boilers and sequence control of boilers. At first, a mathematical model is derived from real heat plant measurements by identification methods. Used are transient response analysis and last square method. With model design a load behavior was discussed. For the model a control system is created. The control system, created with block library of the REX control system, consists of PI controller and finite-state machine for boiler switching control. At the end was controller design verified by simulation for various values of the load.

## **Key words**

HVAC, heating, control, boiler, switch-on ration (epsilon), boilers cascade, changeover criteria, system indentification, FIT, MRE, load, PI control, finite-state machine, REX control system

# Obsah

Seznam obrázků	vii
Seznam tabulek	x
<b>1 Úvod</b>	<b>1</b>
<b>2 HVAC systémy</b>	<b>3</b>
2.1 Druhy řízení HVAC systémů . . . . .	3
2.1.1 Dvoustavová regulace . . . . .	4
2.1.2 Třístavová regulace (Floating control) . . . . .	4
2.1.3 Spojitá (modulární) regulace . . . . .	4
2.1.4 P regulátor . . . . .	5
2.1.5 PI regulátor . . . . .	5
2.1.6 PID regulátor . . . . .	6
<b>3 Regulace vytápění</b>	<b>7</b>
3.1 Řízení kotlů . . . . .	9
3.1.1 Jednostupňový hořák . . . . .	9
3.1.2 Spínací poměr . . . . .	9
3.1.3 Vícestupňový hořák . . . . .	10
3.1.4 Modulační hořáky . . . . .	12
3.2 Řízení kaskády kotlů . . . . .	13
3.2.1 Sekvenční řízení podle venkovní teploty . . . . .	15
3.2.2 Sekvenční řízení podle teploty vody jednotlivých kotlů . . . . .	15
3.2.3 Sekvenční řízení podle zátěže a spínacího poměru . . . . .	16
3.2.4 Sekvenční řízení podle teploty přívodní vody do spotřebitelských okruhů . . . . .	16
3.2.5 Sekvenční řízení podle teploty vratné vody . . . . .	17



3.2.6	Sekvenční řízení maximální teploty přívodní a vratné vody . . . . .	17
3.2.7	Sekvenční řízení podle zátěže hořáků . . . . .	18
<b>4</b>	<b>Identifikace systémů</b>	<b>19</b>
4.1	Přechodová analýza . . . . .	20
4.2	Metoda nejmenších čtverců . . . . .	21
4.3	Hodnocení kvality modelu . . . . .	22
<b>5</b>	<b>Identifikace modelu reálného systému</b>	<b>24</b>
5.1	Zkoumaná kotelná . . . . .	24
5.2	Identifikace modelu z naměřených dat . . . . .	25
5.2.1	První naměřená data . . . . .	25
5.2.2	Pracovní bod . . . . .	27
5.2.3	Aproximace přechodovou charakteristikou 1.řádu . . . . .	28
5.2.4	Druhá sada měřených dat . . . . .	30
5.2.5	Zátěž (potřeba tepla ) otopné soustavy . . . . .	35
<b>6</b>	<b>Návrh řízení</b>	<b>41</b>
6.1	Popis návrhu . . . . .	41
6.1.1	Výběr metody řízení . . . . .	41
6.1.2	Sekvenční spínač hořáků . . . . .	42
6.1.3	Využité bloky systému REX . . . . .	43
6.2	Vlastní realizace návrhu . . . . .	45
6.2.1	Návrh automatu přepínání hořáků . . . . .	45
6.2.2	Ladění PI regulátoru . . . . .	48
6.3	Simulace . . . . .	49
<b>7</b>	<b>Závěr</b>	<b>53</b>
<b>A</b>	<b>Obsah příloženého CD</b>	<b>I</b>

# Seznam obrázků

2.1	Schéma principu dvoustavové regulace. . . . .	4
3.1	Určení spínacího poměru. $y$ je aktuální výkon kotle, $t_{ch}$ určuje dobu chodu kotle (trvání pulzu) a $t_p$ spínací periodu. . . . .	10
3.2	Vývoj teploty v čase při řízení dvoustupňového hořáku dvoustupňovým regulátorem. S1 a S2 označují stupně hořáku, $X_m$ je maximální změna regulované teploty, $s'$ značí maximální přeregulování a oblasti I. a II. označují dobu s částečným a plným zatížením. . . . .	11
3.3	Spínání s integrálem $\sum(K \cdot Min)$ pro dvoustupňový hořák. S1 a S2 označují stupně hořáku, $X_m$ je maximální změna regulované teploty, $t_{min}$ určuje dobu, po kterou nesmí být zapnut 2. stupeň hořáku, $t_{ch1}$ a $t_{ch2}$ jsou doby načítání obsahů ploch $P_1$ a $P_2$ , $T_u$ reprezentuje spínací teplotu a $T_o$ požadovanou teplotu. . . . .	12
3.4	Orientační schéma paralelního zapojení kaskády kotlů. . . . .	13
3.5	Orientační schéma sériového zapojení kaskády kotlů. . . . .	14
3.6	Orientační schéma zapojení pro řízení podle maximální teploty přívodní a vratné vody . . . . .	18
4.1	Přechodová charakteristika systému 1.řádu. $h(t)$ je přechodová funkce. . .	21
5.1	Schematické zapojení topné soustavy . . . . .	25
5.2	Naměřená teplota společného výstupu $T_{TV}$ a požadovaná teplota ze dne 21.10.2013 v době cca od 3:15 do 13:00 . . . . .	26
5.3	Naměřená teplota společného výstupu $T_{TV}$ a výkon kaskády ze dne 21.10.2013 v době cca od 3:15 do 13:00 . . . . .	27
5.4	Výběr části naměřených hodnot, pro identifikaci přechodové funkce . . .	28
5.5	Porovnání normovaných naměřených hodnot (část přechodové charakteristiky) a identifikované přechodové charakteristiky . . . . .	29

5.6	Porovnání modelu a naměřených hodnot. Vstupem modelu jsou skutečné naměřené hodnoty výkonu kaskády. Červeně jsou označeny části s velkou shodou. Žlutě pak části velmi rozdílné. . . . .	30
5.7	Naměřená teplota $t_{TV}$ , hodnota výkonu kaskády (pro přehlednost $\frac{vykon}{4}$ ) a požadovaná teplota z období od 4:57 18.11.2013 do 16:57 20.11.2013 .	31
5.8	Záznam výkonů kaskády a teploty TV z 18.11. v čase 11:45-18:00 a 19.11. v čase 11:40-17:45. . . . .	32
5.9	a) Porovnání modelu a skutečných naměřených teplot z identifikované části dne 18.11.2013. Vstupem jsou naměřené výkony. $FIT = 70.34\%$ , $MRE = 1.9\%$ b) Vývoj identifikovaných parametrů v závislosti na počtu vzorků . .	33
5.10	Porovnání modelu a skutečných naměřených teplot dne 19.11.2013. Vstupem jsou naměřené výkony. $FIT = 72.7\%$ , $MRE = 1.8\%$ . . . . .	34
5.11	Porovnání modelu a skutečných naměřených teplot v celém rozsahu 18.11.-20.11.2013. $FIT = 7\%$ , $MRE = 5.1\%$ . . . . .	35
5.12	Vybraný úsek naměřených dat pro určení odhadu zátěže . . . . .	36
5.13	Integralní výpočet spínacího poměru . . . . .	36
5.14	Vývoj odhadnuté aktuální celkové zátěže v porovnání s aktuálním výkonem kaskády . . . . .	38
5.15	Schema simulace pro zjištění potřebného výkonu modelované kaskády pro regulaci na požadované teploty . . . . .	39
5.16	Graf "poruchové" zátěže otopné soustavy v porovnání s požadovanou teplotou	39
5.17	a) Porovnání chování modelu s vlivem zátěže s naměřenými hodnotami se stejnými vstupními signály ( $FIT = 57\%$ , $MRE = 2.52\%$ ). b) Porovnání chování modelu bez vlivu zátěže s naměřenými hodnotami se stejnými vstupními signály. $FIT = 12.8\%$ , $MRE = 4.68\%$ . . . . .	40
6.1	Schema fungování spínače hořáků . . . . .	42
6.2	Schema subsystému přepínače hořáků Automat . . . . .	46
6.3	Popis automatu v jazyce SFC . . . . .	47
6.4	Schema subsystému Hořáky pro převod logických signálů na signály výkonu kotlů . . . . .	49
6.5	Nižší křivka vyjadřuje přechodovou charakteristiku uzavřené smyčky systému s navrženým regulátorem s reakcí na poruchu. Horní křivka hodnoty řízení $u(t)$ . Hodnota poruchy je -4. . . . .	50
6.6	Celé simulační schéma navrženého řízení a modelu systému . . . . .	50

6.7	a) Simulace řízení kaskády kotlů na požadovanou teplotu přírodní vody do systému (bez uvažování změny zátěže). b) Výkony jednotlivých kotlů soustavy v průběhu simulace. . . . .	51
6.8	a) Simulace řízení kaskády kotlů na požadovanou teplotu přírodní vody do systému (při konstantní poruše na vstupu). b) Výkony jednotlivých kotlů soustavy v průběhu simulace. . . . .	52
6.9	a) Simulace řízení kaskády kotlů na požadovanou teplotu přírodní vody do systému (s odhadnutou zátěží). b) Vývoj zátěže ve simulovaném období.	52

# Seznam tabulek

6.1	Tabulka stavů automatu spínače hořáků . . . . .	43
6.2	Tabulka stavů a přechodů pro blok ATMT . . . . .	44

# Kapitola 1

## Úvod

Žijeme v době, kdy je stále více připomínána blížící se energetická krize, způsobená vlivem nedostatku fosilních paliv a nadměrné spotřeby energie. Většího významu nabývá i téma vlivu člověka a lidské činnosti na životní prostředí.

V [5] se uvádí, že Evropská unie ve snaze zajistit udržitelný rozvoj představila v roce 2006 akční plán pro energetickou účinnost, kde jedním z hlavních cílů bylo dosáhnout 20% úspor ve spotřebě primární energie v EU oproti výhledům na rok 2020, tedy dosáhnout úrovně spotřeby energie z roku 1990. V roce 2007 pak byl stanoven dílčí cíl v oblasti klimatu a energetiky, 20% snížení emisí skleníkových plynů v porovnání s rokem 1990.

Tímto a samozřejmě také úsporou finančních prostředků je motivován výzkum pokročilých řídicích algoritmů HVAC systémů. Jejich využitím je možné snížit náklady na provoz, snížit emise skleníkových plynů a prodloužit životnost jednotlivých součástí soustavy.

Cílem této práce je seznámení se s problematikou řízení vytápění, ventilace a klimatizace (HVAC), podrobněji pak se základními technikami používanými v regulaci vytápění. Na základě těchto poznatků práce představuje návrh řízení kaskády kotlů. Navržené řízení bude ověřeno na modelu získaného z dat reálné kotelny.

V této práci je nejprve popsáno, co jsou HVAC systémy a jsou představeny základní užívané mechanismy řízení těchto systému (tj. dvoustavová a třístavová regulace, spojitá regulace).

Následně jsou představeny způsoby regulace vytápění a osvětleny pojmy z oblasti řízení kotlů (např. spínací poměr) a řízení kaskád kotlů. Z oblasti kaskád kotlů tato práce uvádí kupříkladu dva používané způsoby hydraulického zapojení soustavy (paralelní a sériové zapojení), či podmínky kladené na řízení takovéto soustavy. Především však představuje užívané přístupy k řízení spínání kotlů v kaskádě (např. spínání podle

venkovní teploty, podle teploty vratné vody, podle teploty přívodní vody do spotřebitelských okruhů atd.).

Pro účely návrhu řízení a jeho ověření bude vytvořen matematický model systému. Součástí práce bude popis některých metod identifikace systému (přechodová analýza, metoda nejmenších čtverců), které budou následně využity k získání parametrů modelu. Jelikož chování otopných soustav je závislé na vývoji jejich zátěže, bude v práci představena heuristika pro odhad zátěže kaskády vycházející z poznatků o spínacím poměru.

Závěr této práce bude věnován návrhu řízení s využitím bloků řídicího systému REX a simulačního prostředí Simulink. Pro řízení kaskády bude využito řízení podle teploty přívodní vody do spotřebitelských okruhů. Tento přístup využívá PI regulátor v kombinaci s krokových regulátorem. V této práci bude tento přístup modifikován. Místo krokového regulátoru bude navrhnout sekvenční automat spínání jednotlivých výkonových stupňů kotlů.

Ověření řízení bude provedeno v simulačním prostředí Simulink a výsledky budou porovnány s naměřenými daty. Hlavním kritériem pro porovnávání je počet sepnutí jednotlivých kotlů.



# Kapitola 2

## HVAC systémy

HVAC (Heating, ventilation and air-conditioning) systémy slouží k řízení teploty, vlhkosti a kvality vzduchu nejen v budovách. Toto označení může zahrnovat systémy od jednoduchých kamen až po velmi složité systémy sloužící ke kontrole prostředí v ponorkách či vesmírných plavidlech. V [6] se uvádí, že počátky HVAC systémů sahají do poloviny 19.století, kdy byl doktoru Jonhu Gorriemu patentován stroj na výrobu ledu.

V dnešní době tyto systémy obsahují systémy na vytápění, chladicí systémy, systémy na čištění vzduchu (např. od prachu), systémy na úpravu vlhkosti vzduchu a větrací systémy, které spolupracují. Právě spoluprací těchto systémů, je možné dosáhnout požadovaných výsledků se značnou úsporou vynaložené energie.

Dodejme, že přestože v této oblasti bylo dosaženo významného pokroku, stále jsou otevřené možnosti k dalšímu výzkumu. Nyní je úsilí zaměřováno na zajištění vnitřní kvality vzduchu (z důvodu např. nárůstu počtu osob s dýchacími obtížemi či nedostačující kvalitě ovzduší v továrnách), omezení emisí skleníkových plynů či na možnosti uchování energie.

Historie, užití a řízení HVAC systémů je dobře popsáno například v [2] a [6], popřípadě [7].

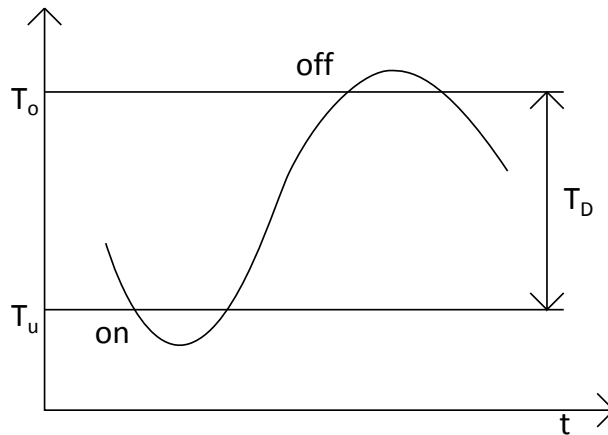
### 2.1 Druhy řízení HVAC systémů

Svou pozornost nyní obraťme na stručné představení základních principů řízení užívaných u HVAC systémů popsaných v [2].

### 2.1.1 Dvoustavová regulace

Jedná se o nejjednodušší přístup regulace, přesto velmi používaný. Například v domácích termostatech pro řízení teploty. Má dva stavy zapnout (on) a vypnout (off).

Princip fungování vysvětleme na příkladu dvoustavového kotlového spínače hořáku. Regulátor zapne hořák pokud teplota klesne pod určenou hodnotu  $T_u$  a opět ho vypne pokud přesáhne hodnotu  $T_o$ , která většinou odpovídá požadované teplotě. Rozdíl těchto hodnot určuje spínací diferenci  $T_D$  (viz Obrázek 2.1 ).



Obrázek 2.1: Schéma principu dvoustavové regulace.

### 2.1.2 Třístavová regulace (Floating control)

Řízené zařízení v tomto případě spojitě mění svůj výkon, dokud jsou spojené určité kontakty (vstup má např. hodnotu 1 nebo -1), pokud se rozpojí zařízení setrvává v aktuálním stavu (vstup má hodnotu 0). Pro větší srozumitelnost uveďme příklad. Budeme chtít řídit průtok. Spojíme kontakty pro otevírání ventilu ( $vstup = 1$ ), zatímco budou kontakty spojené, bude se ventil pomalu otevírat a zvyšovat průtok. Rozpojíme-li kontakt ( $vstup = 0$ ), ventil zůstane v aktuální pozici a průtok bude konstantní. Pokud budeme chtít naopak průtok zmenšit, spojíme kontakty pro otáčení ventilu v závěrném směru ( $vstup = -1$ ).

### 2.1.3 Spojitá (modulární) regulace

Spojitá regulace označuje regulaci, kdy výstup regulátoru může být neomezeně spojitě měněn v určeném rozsahu regulátoru. V tomto případě řízený systém mění hodnotu

sledováním výstupu regulátoru.

Při použití modulární regulace se využívají nejčastěji tři hlavní režimy regulace (druhy spojitých regulátorů).

### 2.1.4 P regulátor

Proporciální regulátor je nejjednodušším spojitým regulátorem. Je využíván ve většině pneumatických a starších elektrických HVAC systémech. P regulátor je dán algebraickou rovnicí a přenosem (viz [11])

$$u(t) = k_p e(t), \quad \frac{U(s)}{E(s)} = k_p, \quad (2.1)$$

kde  $u(t)$  je řízení (výstup regulátoru),  $e(t)$  je regulační odchylka a  $k_p$  je proporcionální konstanta. Výstup regulátoru je tedy dán  $k_p$  násobkem regulační odchylky.

Nevýhodou P regulátoru je trvalá regulační odchylka. Ukažme si tento fakt na řízeném systému prvního řádu.

$$F_s(s) = \frac{b_0}{a_1 s + a_0} \quad (2.2)$$

Výpočtem věty o konečné hodnotě pro přechodovou funkci regulační odchylky uzavřené regulační smyčky dostáváme

$$\lim_{t \rightarrow \infty} h(t) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{1}{s} \cdot s \frac{a_1 s + a_0}{a_1 s + a_0 + k_p b_0} = \frac{a_0}{a_0 + k_p b_0}. \quad (2.3)$$

Je tedy zřejmé, že regulační odchylka je nenulová, pokud  $a_0 \neq 0$ .

### 2.1.5 PI regulátor

Proporcionálně integrační regulátor je dán rovnicí a přenosem.

$$u(t) = k_p e(t) + k_I \int_0^\infty e(t) dt, \quad \frac{U(s)}{E(s)} = k_p + \frac{k_I}{s}, \quad (2.4)$$

kde  $k_I$  je integrační konstanta.

Dodejme, že v dalších kapitolách je užíván i PI regulátor s přenosem ve tvaru

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K \left( 1 + \frac{1}{T_I s} \right), \quad (2.5)$$

kde  $K$  je proporcionální zesílení a  $T_I$  integrační časová konstanta (viz [13]).

Výpočtem regulační odchylky v nekonečnu jako v předchozím případě

$$\lim_{t \rightarrow \infty} h(t) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{1}{s} \cdot s \frac{a_1 s^2 + a_0 s}{a_1 s^2 + a_0 s + k_p b_0 s + k_I b_0} = \frac{0}{k_I b_0} = 0, \quad (2.6)$$

dostáváme závěr, kvůli kterému je PI regulátor velmi používaný. PI regulátor reguluje na nulovou regulační odchylku v ustáleném stavu.

### 2.1.6 PID regulátor

Proporcionálně integračně derivační regulátor charakterizuje rovnice (viz [11])

$$u(t) = k_p e(t) + k_I \int_0^{\infty} e(t) dt + k_D \frac{de(t)}{dt}, \quad (2.7)$$

tedy přenos

$$\frac{U(s)}{E(s)} = k_p + \frac{k_I}{s} + k_D s \quad (2.8)$$

Stejně jako u PI regulátoru i zde je používán také alternativní zápis s vytknutým proporcionálním zesílením (viz [13]).

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K \left( 1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right), \quad (2.9)$$

kde  $T_D$  je derivační časová konstanta.

Derivační složka je přidávána ke snížení přeregulování v případě potřeby rychlé odezvy na změnu požadované hodnoty.

Pro spojitě řízení HVAC systémů je nejčastěji využíván PI regulátor.

# Kapitola 3

## Regulace vytápění

V této kapitole se zaměříme na regulaci systémů pro vytápění budov. Této problematice se podrobněji věnují [1], [3] a [8]. Vybereme z těchto publikací pouze stěžejní body pro tuto práci.

Základem regulace systémů vytápění je regulace tepelného výkonu topné soustavy tak, aby byly splněny určené požadavky na regulovanou veličinu, kupříkladu požadovaná teplota vzduchu v místnosti. Pro regulaci tepelného výkonu můžeme využít tří možných přístupů (viz [1], [8]):

- regulace zdrojů tepla,
- centrální regulace otopné soustavy či jejich částí,
- místní regulace jednotlivých tepelných spotřebičů.

Tato práce bude zaměřena na regulaci zdrojů tepla. Zkoumáme a řídíme otopnou soustavu, kde topným médiem je voda. Zmiňme, že pro takovéto soustavy lze regulovat tepelný výkon dvěma základními způsoby. Kvalitativně a kvantitativně.

Kvalitativní regulací se označuje způsob regulace, při které se mění teplota topné vody, ale průtok zůstává konstantní.

Oproti tomu při kvantitativní regulaci se mění průtok a konstantní zůstává teplota topné vody.

Pokud se oba tyto způsoby zkombinují, hovoří se o sdružené regulaci (viz [1], [8]).

Kromě těchto způsobů regulace je ovšem také třeba vybrat řídicí veličinu, podle jejíchž hodnot budeme regulovat teplotu topné vody. Obecně jsou to následující 4 druhy regulace.

- regulace podle teploty výstupní vody z kotle,

- regulace podle vnitřní teploty vzduchu,
- regulace podle venkovní teploty vzduchu,
- regulace podle zátěže.

**Regulace podle teploty výstupní vody z kotle** je nejjednodušší formou regulace teploty topné (přívodní) vody. Reguluje se teplota snímaná čidlem přímo v přívodní trubce.

**Regulace podle vnitřní teploty vzduchu** využívá snímače teploty vzduchu vytápěného prostoru. Snímač se umístí do jedné z místností, tzv. referenční místnost. Podle teploty v ní se reguluje teplota topné vody. To může samozřejmě způsobit, že se bude topit i v místnostech, kde to není třeba. Tato regulace se nedoporučuje kupříkladu u vícegeneračních domů.

**Regulace podle venkovní teploty vzduchu** je často v literatuře nazývána ekvitemní regulací. Využívá k regulaci tzv. otopnou křivku. Ta určuje závislost mezi požadovanou topnou vodou (potřebou tepla) a venkovní teplotou. V tomto případě se čidlo umísťuje na vnější fasádu. Informace z něho jde přímo regulátoru, který podle ní a otopné křivky řídí spínání hořáku. Tento způsob regulace je v dnešní době nejpoužívanější.

**Regulace podle zátěže** nevyužívá žádná prostorová ani venkovní čidla. Regulace podle zátěže nebo podle potřeby tepla vychází z vytvoření křivky zátěže (potřeby tepla). Tato křivka udává závislost požadované teploty na aktuální zátěži kotle  $q$ . Uvedme, že aktuální zátěž kotle  $q$  v [8], je ekvivalentní ke spínacímu poměru  $\epsilon$  v textu [3]. Spínacímu poměru (tedy aktuální zátěži) bude věnována pozornost později v této práci. Nyní pouze zdůrazněme, v jakých případech je tento způsob řízení dobře využitelný. Předpoklady jsou například dobrá tepelná izolace stavby, jednostupňový hořák kotle, užití TRV (termostatických radiátorových ventilů), absence vnitřních a venkovních teplotních snímačů.

Byly představeny základní způsoby regulace teploty topné vody. Předvedené způsoby ukazovaly, jak je možné určit požadované hodnoty teploty topné vody, nyní se však zaměříme na regulaci na požadovanou hodnotu topné vody řízením výkonu kotlů.

## 3.1 Řízení kotlů

Základním požadavkem na řízení kotlů, je nízká regulační odchylka od požadované teploty. Avšak v dnešní době klademe stále větší důraz i na úsporu energií a snížení emisí skleníkových plynů. Ve spojitosti s tímto je často jako důležitý faktor uváděna spínací frekvence hořáků. Krátký čas běhu hořáku a časté spínání snižuje celkovou účinnost kotle. V [8] je též uvedeno, že ve fázi startu hořáku jsou vždy zvýšené hodnoty uhlovodíků, CO, sazí apod. Snahou je tedy prodloužit dobu běhu hořáku.

V této chvíli však můžeme pozorovat, že snaha minimalizovat regulační odchylku koliduje s požadavkem na prodloužení doby běhu kotle. Je třeba najít kompromis.

V následující části si popíšeme některé využívané metody pro řízení kotlů. Nejprve se budeme věnovat některým metodám řízení kotlů s jednostupňovým, vícešupňovým či modulačním hořákem, později pak řízením kaskády kotlů. Informace byly čerpány z již zmíněných publikací [1], [3] a [8].

### 3.1.1 Jednostupňový hořák

Nejjednodušším a stále velice často používaným způsobem regulace teploty vody je užití termostatu. Ve své základní podobě je termostat dvoupolohový regulátor, který zapne hořák, pokud teplota klesne pod určenou hodnotu  $T_u$ , a opět ho vypne, pokud přesáhne hodnotu  $T_o$ , která většinou odpovídá požadované teplotě. Rozdíl těchto hodnot určuje tzv. spínací diferencí  $T_D$  (viz podkapitola 2.1.1). Malá hodnota spínací difference evidentně povede ke kratší době chodu hořáku.

Avšak hlavní vliv na dobu chodu hořáku má výkon kotle a spotřeba tepla. Pokud bude velká spotřeba tepla, bude hořák v provozu dlouho, je tedy možné mít menší spínací diferencí. Pokud je ovšem malá spotřeba tepla, doba chodu hořáku je krátká. V takovémto případě by byla výhodnější velká teplotní difference. Vzhledem k tomu se někdy využívá tzv. proměnná spínací difference, která je závislá na potřebě tepla.

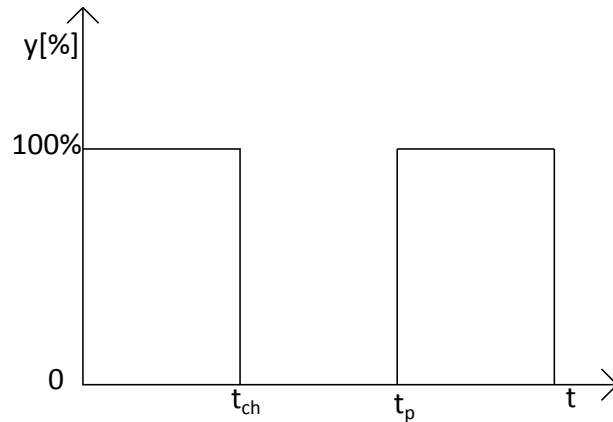
Již dříve jsme uvedli, že u jednostupňových hořáků se pro určení potřeby tepla používá spínací poměr.

### 3.1.2 Spínací poměr

U jednostupňových hořáků je tepelný výkon přiváděný do soustavy pulzy se 100% výkonem (viz Obrázek 3.1), jejichž délka je ovlivněna zátěží. Čím více bude třeba ohřáté



vody, tím delší bude pulz. Jak jsme již uvedli výše, prodlouží se doba chodu hořáku.



**Obrázek 3.1:** Určení spínacího poměru.  $y$  je aktuální výkon kotle,  $t_{ch}$  určuje dobu chodu kotle (trvání pulzu) a  $t_p$  spínací periodu.

Toho se využívá díky spínacímu poměru, který je určen vztahem

$$\epsilon = \frac{t_{ch}}{t_p}, \quad (3.1)$$

kde  $t_{ch}$  určuje dobu chodu kotle (trvání pulzu) a  $t_p$  spínací periodu.

Pokud je hodnota  $\epsilon = 1$  jedná se o maximální aktuální zatížení kotle, kotel běží pořád. Pokud je 0, pak je kotel nezatížen.

Díky spínacímu poměru jsme schopni získat kupříkladu průměrnou hodnotu výkonu  $y$  ve spínací periodě.

$$y = y_m \cdot \epsilon, \quad (3.2)$$

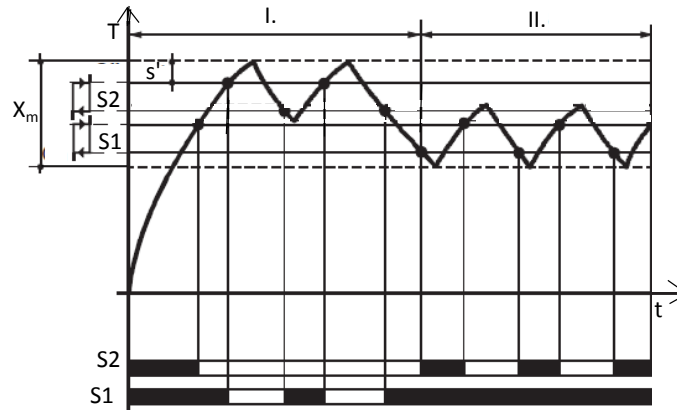
kde  $y_m$  je 100% výkonu kotle.

### 3.1.3 Vícetupňový hořák

Podíváme se nyní na některé způsoby řízení vícetupňových hořáků.

Jedním způsobem je opět využití termostatu. Pro každý stupeň hořáku jsou nastaveny teploty sepnutí a vypnutí. Vysvětleme si fungování tohoto způsobu na dvoustupňovém hořáku na obrázku 3.2. Hraniční hodnoty pro spínání a vypínání prvního stupně budou nastaveny obdobně jako u jednostupňových hořáků, první stupeň bude vypnut při dosažení požadované hodnoty. Avšak spínací a vypínací hodnoty druhého stupně musí být nižší, než spínací hodnota prvního stupně.

Při částečném zatížení se spouští pouze první stupeň a reguluje na požadovanou hodnotu. Při plném zatížení se spouští i druhý stupeň, ale reguluje na nižší teplotu než je požadovaná.



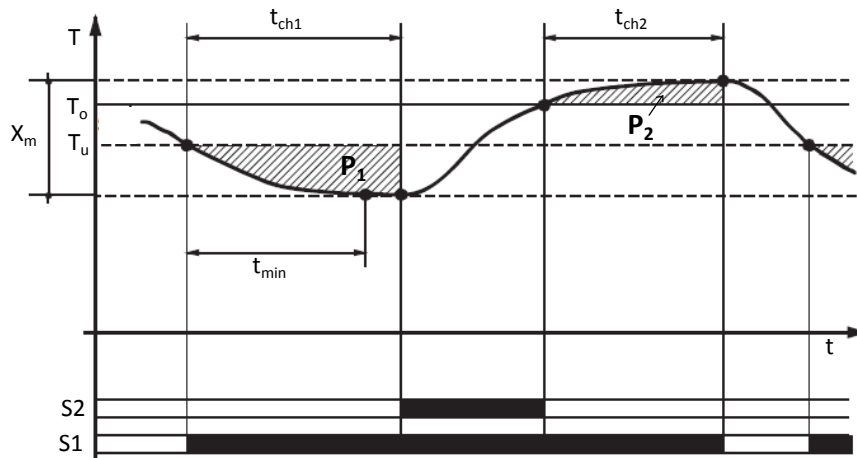
**Obrázek 3.2:** Vývoj teploty v čase při řízení dvoustupňového hořáku dvoustupňovým regulátorem. S1 a S2 označují stupně hořáku,  $X_m$  je maximální změna regulované teploty,  $s'$  značí maximální přeregulování a oblasti I. a II. označují dobu s částečným a plným zatížením.

Větší podrobnosti k tomuto návrhu jsou v textu [3].

Druhou možností je využití pouze jednoho dvoustupňového regulátoru. Opět je nastavena teplota zapnutí a vypnutí. Nejprve sepne první stupeň, další stupně následně spínají s pevně danou časovou prodlevou, dokud není dosaženo vypínací teploty. Po dosažení vypínací teploty jsou jednotlivé stupně vypínány opět s pevně danou časovou prodlevou (viz [8]).

Třetím způsobem je spínání založené na obsahu  $P_1$  (resp.  $P_2$ ) plochy dané odchylkou teploty  $T$  od spínací teploty  $T_u$  (resp.  $T_o$ ). Příkladem budiž spínání dvoustupňového hořáku (viz Obrázek 3.3). Tento způsob je v [3] označován jako spínání s integrálem  $\Sigma(K \cdot Min)$ .

Spadne-li teplota  $T$  pod  $T_u$ , začne se od toho okamžiku načítat integrál rozdílu teplot  $T$  a  $T_u$  podle času,  $P_1 = \int_0^{t_{ch1}} (T_u - T(t)) dt$ . V té samé chvíli se spustí i časovač. Ten



**Obrázek 3.3:** Spínání s integrálem  $\sum(K \cdot Min)$  pro dvoustupňový hořák. S1 a S2 označují stupně hořáku,  $X_m$  je maximální změna regulované teploty,  $t_{min}$  určuje dobu, po kterou nesmí být zapnut 2. stupeň hořáku,  $t_{ch1}$  a  $t_{ch2}$  jsou doby načítání obsahů ploch  $P_1$  a  $P_2$ ,  $T_u$  reprezentuje spínací teplotu a  $T_o$  požadovanou teplotu.

slouží k zamezení sepnutí 2. stupně, než uplyne určená doba ( $t_{min}$ ). Druhý stupeň se sepne až v okamžiku, kdy hodnota časovače je větší než určené omezení a obsah  $P_1$  je roven požadované hodnotě.

K vypnutí druhého stupně dochází, když je aktuální teplota rovna požadované ( $T_o$ ). V témže okamžiku se začne opět načítat integrál odchylky, tentokrát od požadované teploty ( $P_2$ ). Pokud tento integrál nabude zvolené hodnoty, vypne se i 1. stupeň.

Obdobným způsobem je možné řídit i vícestupňové hořáky.

### 3.1.4 Modulační hořáky

Zatím byly zmíněny přístupy uvažující skokovou změnu výkonu kotle. Jelikož však moderní kotle jsou často vybaveny modulačními hořáky, zaslouží si alespoň malou zmínku.

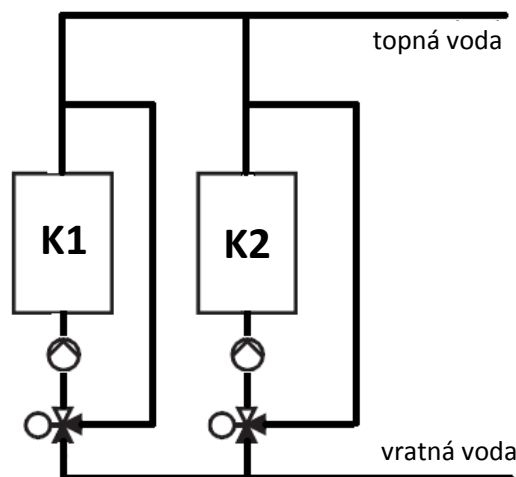
Modulační hořáky jsou takové, které mohou plynule měnit svůj výkon. Avšak i u takovýchto hořáků se výkon nejprve skokově změní z 0 do startovacího výkonu, od kterého je poté schopný plynulé změny. V moderních kotlích se můžeme setkat se startovacím výkonem menším než 20%. Můžeme tedy modulovat 80% výkonu. Operuje-li kotel ve výkonové oblasti s plynulou změnou výkonu, používá se pro regulaci PI regulátor. Pokud je potřebný výkon menší než startovací, využívají se výše popsané přístupy.

Při použití kotlů s modulačními hořáky lze dosáhnout vysokého stupně využití kotle, kvůli extrémně nízkým teplotám spalin při modulovaném provozu.

## 3.2 Řízení kaskády kotlů

Předtím, než se začneme věnovat řízení, by mělo být ukázáno, jaké jsou možnosti zapojení kotlů do kaskády. Obecně se hovoří o dvou možnostech zapojení, podrobněji zpracovaných v [3], paralelní (Obrázek 3.4) a sériové (Obrázek 3.5).

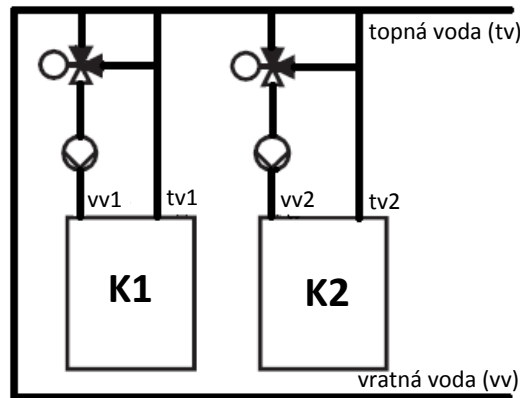
**Paralelní zapojení** zajišťuje stejnou teplotu vratné vody pro všechny kotle v kaskádě. Paralelní zapojení je velmi časté. Nejenže je jednoduché ho zapojit, ale předchází situaci,



Obrázek 3.4: Orientační schéma paralelního zapojení kaskády kotlů.

kdy by další připojený kotel pracoval s nízkou účinností při nízké zátěži.

**Sériové zapojení** oproti tomu nezachovává stejnou teplotu vratné vody pro všechny kotle kaskády. Může nastat případ, kdy topná voda prvního kotle je vratnou vodou kotle následujícího. Sériové zapojení se používá především v případech, kdy pracujeme se zdrojem tepla, který potřebuje nízkou teplotu vratné vody (kondenzační kotel, tepelné čerpadlo) a je zapojen před (proti proudu) konvenčním kotlem.



**Obrázek 3.5:** Orientační schéma sériového zapojení kaskády kotlů.

Nyní již přejdeme k řízení kaskád kotlů. Tímto tématem se zabývají články [3] a [9]. Základní požadavky na řízení kaskády kotlů jsou stejné jako na řízení samostatných kotlů, regulovat na požadovanou teplotu při zajištění co nejdelší doby provozu kotlů.

Je třeba však brát v úvahu i následující požadavky pro optimální spínání kotlů:

- každý kotel by měl být zapnut ve vhodný okamžik pro zajištění nepřetržité dodávky tepla,
- žádný kotel nesmí být spouštěn příliš často, abychom se vyvarovali zbytečných ztrát při zapnutí a vypnutí,
- doba chodu každého kotle musí být dostatečně dlouhá, aby se mohl odpařit kondenzát ze spalin v kotli a spalinových odvodech (ochrana před korozí),
- každý kotel by měl být zapnut, až je-li to skutečně nutné.

Toto jsou požadavky na každý z kotlů kaskády, rozdělme si je nyní na dvě skupiny. Kotel, který se spíná jako první nazýváme kotlem vedoucím (lead boiler), primárním, ostatní kotle kaskády označujeme jako následné (lag boiler).

Je velmi vhodné při spínání kotlů zohledňovat i aktuální stav následných kotlů. Uvedme alespoň některé poznatky a doporučení s tím související:

- zahřátý kotel je možné provozovat rychleji než studený,
- následný kotel by neměl být vypnut, dokud vedoucí kotel není schopen sám pokrýt aktuální potřebu tepla,

- při poruše kotle by se mělo být možné automaticky přepnout na další kotel,
- porouchaný kotel musí být možné hydraulicky odpojit od systému.

Byly představeny některé z požadavků na spínání kotlů v kaskádě. V dalším textu se zaměříme na kriteria, podle kterých bývá spínání sekvenčně řízeno. Vhodnost použití jednotlivých kritérií je třeba posuzovat individuálně u každé řízené kaskády. Kromě manuálního přepínání jsou nejčastěji používanými metody automatického řízení spínání kotlů:

- podle venkovní teploty
- podle teploty vody jednotlivých kotlů
- podle zátěže a spínacího poměru
- podle teploty přívodní vody do spotřebitelských okruhů
- podle teploty vratné vody
- podle maximální teploty přívodní a vratné vody
- podle zátěže hořáků

### 3.2.1 Sekvenční řízení podle venkovní teploty

Pokud ji snímáme, je venkovní teplota dobrou referenční hodnotou pro spínání kotlů v kaskádě, pakliže většina (90% a více) výkonu kaskády je využíváno k vytápění prostor. Protože aktuální venkovní teplota je velmi proměnlivá, může se stát, že bude následující kotel spínat a vypínat příliš často, pokud bude venkovní teplota v okolí spínací teploty. Proto se využívá tlumené či geometrické venkovní teploty (viz [8]). Venkovní teplotu můžeme také využít k uzamčení následujících kotlů. Což znamená, že je bude možné použít, až pokud venkovní teplota klesne pod určenou mez.

### 3.2.2 Sekvenční řízení podle teploty vody jednotlivých kotlů

Nejjednodušším způsobem řízení je v tomto případě již známý princip termostatu. Následující kotel je spuštěn až v momentě, kdy teplota vedoucího kotle klesne pod určenou teplotu. Při použití obvyklých spínacích diferencí a požadovaných spínacích intervalů

způsobuje velké teplotní výkyvy topné (přívodní) vody. Mimo jiné mají sklon oscilovat i přes použití komplikovaných časovačů. Velmi velké zpoždění spínání vede k výrazným poklesům teploty vedoucího kotle, což může napomáhat nízkoteplotní korozi.

Tyto problémy je možné odstranit využitím digitálních regulátorů teploty, které umožňují libovolný počet spínacích kroků s různými spínacími diferencemi. Při použití digitálních regulátorů, se často využívá, dříve popsany princip, kdy pokud teplota vedoucího kotle poklesne určenou hodnotu, začne se načítat integrál popsany v 3.1.3.

### 3.2.3 Sekvenční řízení podle zátěže a spínacího poměru

V tomto případě má každý kotel vlastní regulátor teploty a u každého z kotlů se počítá spínací poměr (viz 3.1.2). Následující kotle jsou zapínány či vypínány hlavním řízením v návaznosti na maximální výkon kotle (absolutní či relativní) a neustále měřený spínací poměr. Hlavní regulátor sleduje celkovou výkonovou bilanci, aby všechny kotle dosahovaly maximálního možného stupně využití.

### 3.2.4 Sekvenční řízení podle teploty přívodní vody do spotřebitelských okruhů

Pokud bychom v tomto případě chtěli opět uvažovat použití dvoustavového regulátoru, velmi rychle narazíme na problém. Teplota přívodní vody (topné vody) může být použita pouze jako spínací kritérium. Topí-li vedoucí kotel a jeho výkon již nepokrývá potřebu tepla, sníží se teplota přívodní vody pod nastavenou mez a začne topit další kotel. Dvoustavově regulované kotle se, i při nízkém vytížení, podílejí rovnoměrně na krytí potřeby tepla a pracují v přerušovaném provozu. Teplota topné vody je tedy udržována na požadované hodnotě, ale neposkytuje žádné informace o tom, zda-li mohou být zapnuté kotle vypnuty.

Jako vylepšení se nabízí využití proporcionálního regulátoru. Spínání kotlů by přímo záviselo na teplotě přívodní vody, avšak trvalou regulační odchylkou a spínacím zpožděním by bylo způsobeno její velké kolísání. Kvůli tomu je, i přes přínos v podobě prodloužení doby chodu hořáků, využití P regulátoru nevhodné pro více jak dva kotle.

Skutečně využitelným vylepšením je užití PI regulátoru v kombinaci s krokových regulátorem či sekvenčním automatem spínání jednotlivých výkonových stupňů. Hlavní vlastností PI regulátoru je regulace na požadovanou hodnotu s nulovou regulační od-



chylkou v ustáleném stavu (viz podkapitola 2.1.5). Vlivem spínače bude tato vlastnost ztracena, přesto však bude možné regulovat požadovanou teplotu velmi přesně, kolísání bude v malém rozmezí. Avšak snaha PI regulátoru o přesnou regulaci způsobí častější spínání kotlů, což je mírně v rozporu s našimi požadavky. Abychom tomuto častému spínání zabránili, je používán časový omezovač spínání a vypínání kotlů. Ten samozřejmě opět zvětší kolísání požadované teploty. Je tudíž třeba vhodně volit dobu omezení.

### 3.2.5 Sekvenční řízení podle teploty vratné vody

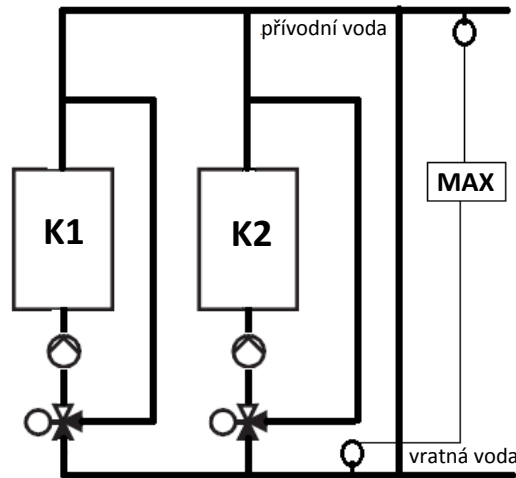
Teplota vratné vody se zdá být ideálním spínacím kritériem, jelikož je přímo závislá na zátěži. Dle článku [3] se však v praxi ukazuje, že užití toho způsobu řízení je velmi komplikované, z hlediska nastavení spínacích hodnot a pochopení procesů topné soustavy, a tedy velice náročné při uvádění do provozu.

Aby se zamezilo oscilacím vznikajícím při tomto typu řízení, používají se opět omezující časovače. Při použití P regulátoru je navíc možné dosáhnout dlouhých dob chodu kotlů. Výhodou je použití tohoto způsobu řízení u kotlů s velkým vodním objemem, které mohou být považovány za zásobníky. Teplota přívodní vody pak může na krátkou chvíli klesnout až na požadovanou hodnotu vratné vody, což také podporuje dlouhou dobu chodu hořáků.

### 3.2.6 Sekvenční řízení maximální teploty přívodní a vratné vody

Tento způsob vylepšuje předchozí řízení podle teploty vratné vody, jehož nevýhodou je, že dochází ke snižování teploty vody vedené k rozdělovači, pokud není od spotřebitele žádná potřeba tepla. Toto snižování zaznamená čidlo a dá pokyn regulátoru teploty přívodní vody, který spustí další stupeň, i když není potřeba, až do doby, kdy je kotel vypnut omezovacím kotlovým termostatem.

Tomuto scénáři lze zabránit umístěním čidla na přívodní vodu za zkratem (viz Obrázek 3.6). Regulátor pak vyhodnocuje vyšší z naměřených teplot. Není-li žádná potřeba tepla od spotřebitele, pak do těchto okruhů voda neproudí a proudí zkratem přímo do vratné vody kotlů. Dojde ke zvyšování teploty vratné vody až na teplotu přívodní vody. Jakmile to zaznamenají čidla, regulátor vypne hořáky.



**Obrázek 3.6:** Orientační schéma zapojení pro řízení podle maximální teploty přívodní a vratné vody

Dodejme, že zkratem se u otopných soustav označuje potrubí, které spojuje potrubí přívodní vody a vratné vody. Slouží k vyrovnání rozdílných tlaků mezi nimi. K rozdílu tlaků dochází kupříkladu u soustav popsanych v [3, str. 16], kdy je kotel vybaven vlastním čerpadlem a otopná tělesa jsou opatřena termostatickými ventily. Různé druhy hydraulického zapojení prvků otopných soustav, včetně užití zkratu, jsou prezentovány v [8].

### 3.2.7 Sekvenční řízení podle zátěže hořáků

Tento způsob může být použit pro kotle s modulačními hořáky. Teplota přívodní vody z každého kotle je řízena samostatně modulačním regulátorem s pevnou požadovanou hodnotou nebo ekvitermně. Následující kotel je zapnut či vypnut v závislosti na zátěži hořáku. Pokud je účinnost spalování větší při částečném zatížení než při plném, může být následující kotel uveden do provozu dříve. Pokud máme v provozu vedoucí a některý z následujících kotlů, jsou řízeny modulárně v rozsahu 30–100%. Pro tento způsob řízení, musí být kotle zapojeny paralelně, aby mezi ně bylo možné rovnoměrně rozdělit zátěž.

# Kapitola 4

## Identifikace systémů

Aby bylo možné správně a efektivně navrhnout řídicí systém či testovat případné návrhy, je třeba nalézt matematický model zkoumaného systému. V základě jsou dvě možnosti odvození matematického modelu. Matematickým modelováním či identifikací systému [10].

Matematické modelování využívá fyzikálních, chemických, ekonomických a dalších zákonů k popisu dynamického chování systémů. Cílem je vytvoření matematického modelu analyticky, bez využití měřených dat.

Identifikace systémů oproti tomu využívá reálných naměřených dat získaných převážně z experimentů prováděných na zkoumaném systému. Jedná se o experimentální metodu získávání matematického modelu, který co nejlépe odpovídá naměřeným veličinám. V tomto přístupu nemáme žádnou informaci o vnitřních pochodech zkoumaného systému, považujeme ho za tzv. černou skříňku (black-box). Modely jsou odvozovány ze znalostí vstupů a výstupů systému.

Jelikož se v této práci vychází z dat měřených na reálném systému, zaměříme se na metody identifikace systémů.

Identifikační metody nejčastěji dělíme na neparametrické a parametrické. Neparametrické metody, též někdy označované jako klasické metody identifikace, charakterizuje vlastnost, že výsledný model jsou křivky nebo funkce. Nejpoužívanější neparametrické metody jsou založené na

- frekvenční analýze
- přechodové analýze
- korelační analýze

- spektrální analýze

Parametrické metody můžeme označit za prostředek pro hledání zobrazení naměřených dat na odhadovaný vektor parametrů modelu. Nejpoužívanějšími metodami jsou

- metoda nejmenších čtverců
- metody chyby predikce
- metoda přídavné proměnné

V následujícím textu si představme jednoho ze zástupců neparametrických i parametrických metod. Přesněji metodu založenou na přechodové analýze a metodu nejmenších čtverců.

## 4.1 Přechodová analýza

Základem této metody je přechodová charakteristika. Na vstup reálného systému v ustáleném stavu, přivedeme jednotkový Heavisideův skok a zaznamenáme výstup, tedy přechodovou charakteristiku, ze které odečteme hodnoty časových konstant a statického zesílení či dopravního zpoždění pro model nejčastěji 1. nebo 2. řádu.

Tento přístup je náchylný k chybám, způsobeným šumem, či kupříkladu nepřesným odečtením hledaných hodnot. Přesto je hojně využívána jako základní prostředek pro návrh jednoduchých regulátorů.

Řekněme kupříkladu, že chceme identifikovat statický systém 1. řádu popsany obrazovým přenosem

$$F(s) = \frac{k}{sT + 1}, \quad (4.1)$$

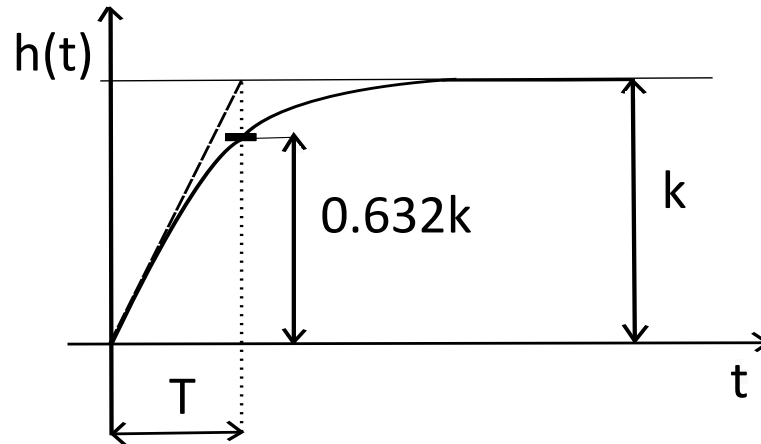
kde  $k$  je statické zesílení a  $T$  časová konstanta. Tyto parametry se budeme snažit určit z přechodové charakteristiky (Obrázek 4.1 z [11]).

Jelikož přechodová funkce  $h(t)$  je dána vzorcem

$$h(t) = k(1 - e^{-\frac{t}{T}}), \quad (4.2)$$

pak pro časovou konstantu  $T$ , která je určena dobou  $t$  v průsečíku tečny přechodové charakteristiky v počátku s ustálenou hodnotou  $h(t)$  [12] platí

$$h(T) = k(1 - e^{-\frac{T}{T}}) = 0.632k \quad (4.3)$$



**Obrázek 4.1:** Přechodová charakteristika systému 1.řádu.  $h(t)$  je přechodová funkce.

Najdeme-li tedy v přechodové charakteristice bod s hodnotou  $h(t) = 0.632k$ , pak časová souřadnice tohoto bodu je rovna časové konstantě  $T$ . Pokud bychom zkoumali systém 1.řádu s dopravním zpožděním, pak  $t_{0.632k} = T + T_d$ , kde  $T_d$  je dopravní zpoždění.

Existují samozřejmě i další metody založené na přechodové analýze, kupříkladu pro periodické a aperiodické systémy 2. řádu, ale těm se již věnovat nebudeme. Více viz [11].

## 4.2 Metoda nejmenších čtverců

Metoda nejmenších čtverců se využívá pro identifikaci parametrů ARX modelů dynamických systémů ve tvaru

$$A(q^{-1}) \cdot y(t) = B(q^{-1}) \cdot u(t-1) + \epsilon(t), \quad (4.4)$$

kde  $\epsilon$  určuje chybu rovnice a polynomy  $A$  a  $B$  představují

$$\begin{aligned} A(q^{-1}) &= 1 + a_1 \cdot q^{-1} + \dots + a_{na} \cdot q^{-na} \\ B(q^{-1}) &= b_0 + b_1 \cdot q^{-1} + \dots + b_{nb} \cdot q^{-nb} \end{aligned}$$

Takovýto model je možné vyjádřit také ve tvaru

$$y(t) = \phi^T(t) \Theta + \epsilon(t), \quad (4.5)$$

kde  $\Theta$  je vektor neznámých parametrů

$$\Theta^T = [a_1, \dots, a_{na}, b_0, \dots, b_{nb}] \quad (4.6)$$

a  $\phi$  je označován jako vektor regresorů ve tvaru

$$\phi^T(t) = [-y(t-1), \dots, -y(t-na), u(t-1), \dots, u(t-nb-1)] \quad (4.7)$$

Pokud bychom brali v úvahu dopravní zpoždění o  $d$  kroků, změnil by se pouze vektor regresorů

$$\phi^T(t) = [-y(t-1), \dots, -y(t-na), u(t-d), \dots, u(t-nb-1-d)] \quad (4.8)$$

Cílem metody je nalézt hodnoty parametrů vektoru  $\Theta$  takové, které minimalizují hodnotu kritéria

$$V_N(\Theta) = \frac{1}{N} \left( \sum_{t=1}^N \epsilon^2(t) \right), \quad (4.9)$$

tedy minimalizují střední kvadratickou chybu rovnice.

V [10] je dokázáno, že optimální odhad parametrů ve smyslu  $V_N(\Theta)$  je

$$\hat{\Theta} = \left[ \frac{1}{N} \left( \sum_{t=1}^N \phi(t)\phi^T(t) \right) \right]^{-1} \left[ \frac{1}{N} \left( \sum_{t=1}^N \phi(t)y(t) \right) \right] \quad (4.10)$$

V [10] je odvozena i modifikace metody nejmenších čtverců pro rekurzivní výpočet. Uvedme, že u rekurzivního přístupu je odhad  $\hat{\Theta}(t)$  vypočítáván na základě odhadu v čase  $t-1$  a měření v čase  $t$ , pokud  $\hat{\Theta}(t-1)$  je založen na datech až do okamžiku  $t-1$ .

Rekurzivní metodu nejmenších čtverců popisují tyto vztahy

$$\hat{\Theta}(t) = \hat{\Theta}(t-1) + K(t)\epsilon(t) \quad (4.11)$$

$$P(t) = P(t-1) - K(t)\phi^T(t)P(t-1)$$

$$\epsilon(t) = y(t) - \phi^T(t)\hat{\Theta}(t-1)$$

$$K(t) = \frac{P(t-1)\phi(t)}{1 + \phi^T(t)P(t-1)\phi(t)},$$

které lze jednoduše algoritmizovat.

### 4.3 Hodnocení kvality modelu

Již bychom byli schopni identifikovat model zkoumaného systému, avšak je třeba získat i informaci o míře shody mezi reálným měřením a chováním modelu. Je potřeba ověřit, zda-li je model skutečně vhodný. Velmi používanými porovnávacími kritérii jsou v literatuře popsány FIT index [16, str. 709] a MRE (Relativní střední odchylka) [15], [14].

**FIT index** je dán vztahem

$$FIT = \left(1 - \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [y(i) - \hat{y}(i)]^2}{\sum_{i=1}^N [y(i) - \bar{y}]^2}}\right) \cdot 100, \quad (4.12)$$

kde  $y$  vyjadřuje naměřené hodnoty,  $\hat{y}$  modelované hodnoty,  $\bar{y}$  pak střední hodnotu  $y$  a  $N$  počet naměřených a modelovaných hodnot.

Nejlepší shoda modelu s měřením je vyjádřena hodnotou  $FIT = 100\%$ .  $FIT=0$  značí, že shoda není lepší, než při odhadu, že výstup je konstantní ( $\hat{y} = \bar{y}$ ). Pokud je hodnota FIT indexu záporná, je výsledek horší než v případě nulového FIT indexu.

**MRE** neboli Mean Relative Error, tedy střední relativní chyba.

Používá se jako porovnávací kritérium a je dána vztahem (viz [15, str. 304])

$$MRE = \frac{1}{N} \left( \sum_{i=1}^N \frac{|\hat{y}(i) - y(i)|}{y(i)} \right), \quad (4.13)$$

kde  $y$  opět reprezentuje naměřené hodnoty a  $\hat{y}$  hodnoty modelované. Výsledky jsou většinou reprezentovány v procentuálním vyjádření  $MRE \cdot 100\%$ .

V literatuře bývá někdy také označované jako MMRE (Mean Magnitude of Relative Error) [17].

# Kapitola 5

## Identifikace modelu reálného systému

Jak již bylo dříve zmíněno, cílem této práce je navrhnout způsob řízení kaskády kotlů a ověřit jeho funkčnost. K tomuto ověření bude zapotřebí vytvořit model řízené kaskády z naměřených dat z reálné kotelny.

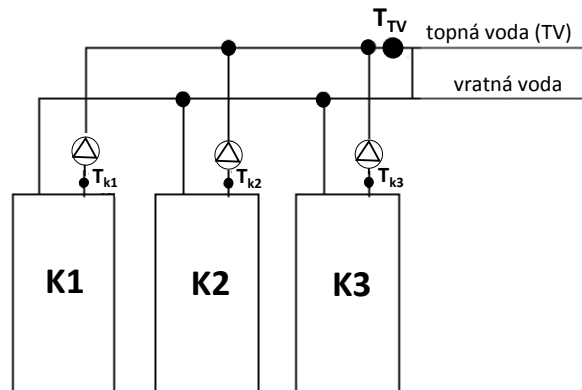
### 5.1 Zkoumaná kotelna

Předlohou nám bude kotelna obsluhující komplex domova pro seniory Hortenzie v obci Bořanovice. Ta obsahuje tři paralelně zapojené stacionární plynové kotle typu Junkers K 1106E23A se součtovým výkonem 300[kW] (Obrázek 5.1). Z typového označení můžeme tyto kotle identifikovat jako plynové kotle s automatickým zapalováním určené pro vytápění. Použitým plynem je zemní plyn H a jmenovitý výkon každého kotle je 110 [kW]. Tyto kotle zásobují teplem celý objekt a zároveň obstarávají ohřev teplé užitkové vody v zásobnících o celkovém objemu 800 litrů. K pokrytí tepelných nároků přispívá svým dílem systém solárního ohřevu vody.

V této práci se ovšem nezabýváme regulací teploty v budově. Nebude nás zajímat teplotní komfort, jelikož o ten se stará nadřazené řízení, které vypočítává požadovanou teplotu přívodní vody do soustavy. Nýbrž námi zkoumanou oblastí je regulace teploty přívodní vody do soustavy, tedy teploty společného výstupu z kaskády, na požadovanou teplotu řízením výkonu jednotlivých kotlů. Každý kotel má instalovaný příložený snímač Termokon VFG54, který snímá výstupní teplotu kotlové vody ( $T_{k1}$ ,  $T_{k2}$ ,  $T_{k3}$ ). Dále je



k dispozici informace ze snímače teploty společného výstupu kotlů ( $T_{TV}$ ), který má sondu přímo v potrubí. Posledním známým údajem jsou pak výkony jednotlivých kotlů, jejichž součet udává výkon celé soustavy. Bohužel není k dispozici žádná informace o aktuální teplotě vratné vody, či o průtoku.



Obrázek 5.1: Schematické zapojení topné soustavy

## 5.2 Identifikace modelu z naměřených dat

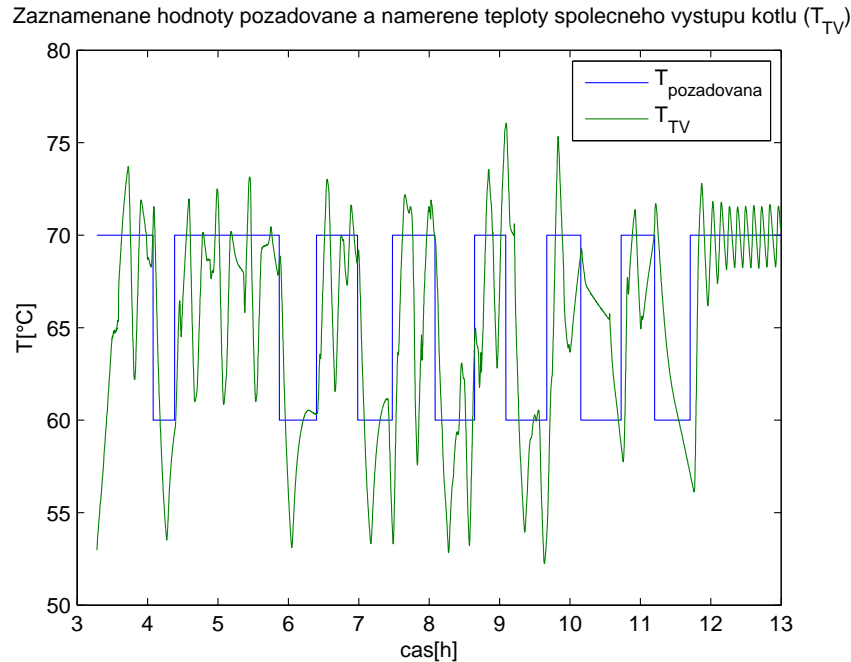
Z předešlého letmého popisu kotelny si můžeme udělat představu s jakými daty můžeme v průběhu návrhu a identifikace systému pracovat. Jedná se tedy o teplotu vody společného výstupu kaskády, teplotu výstupu a výkon jednotlivých kotlů (tedy součtem i výkon celé soustavy) a konečně požadovanou teplotu společného výstupu. Dodejme ještě, že veškerá data jsou shromažďována každých 5 sekund, přičemž není možné v kotelně provádět experimenty, neboť ji zkoumáme při běžném provozu v průběhu topné sezóny.

Jelikož byla zpracovávána data z kotelny v průběhu přechodu starého řídicího algoritmu na nový (vyvinutý v projektu TAČR), pracujeme se dvěma sadami naměřených dat.

### 5.2.1 První naměřená data

Podívejme se tedy nejprve na data z 21.10.2013, kdy byl v provozu původní algoritmus. Naměřená data jsou zobrazována pro větší přehlednost s časovou osou v hodinách.

Povšimněme si výrazných podkmitů teploty topné vody ( $T_{TV}$ ) (Obrázek 5.2) oproti požá-



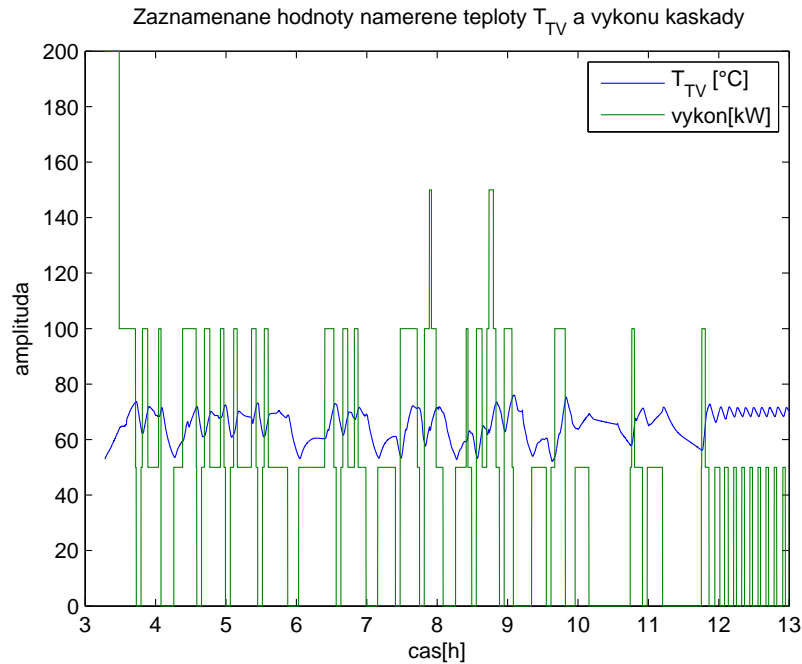
**Obrázek 5.2:** Naměřená teplota společného výstupu  $T_{TV}$  a požadovaná teplota ze dne 21.10.2013 v době cca od 3:15 do 13:00

dované hodnotě. V některých případech až 9 stupňů. Jedním z našich cílů bude je potlačit. Nyní se ovšem zaměříme na identifikaci systému. Vzhledem k chybějícím údajům, o celkovém objemu topného média, průtoku či teploty vratné vody, jsme se rozhodli nevytvořit matematický model využitím fyzikálních zákonů, ale vytvořit model pouze identifikací systému. Přičemž budeme uvažovat, že je systém lineární. Z naměřených hodnot se pokusíme identifikovat přenosovou funkci systému kaskády kotlů, kde vstupní veličinou bude výkon topné kaskády a výstupní veličinou bude teplota společného výstupu z kotlů.

Jelikož shledáváme podobnost s modelováním zdroje tepla v textu [18, strana 25], budeme hledanou přenosovou funkci systému uvažovat ve tvaru statické soustavy prvního řádu, avšak s dopravním zpožděním, jelikož snímač teploty je vzdálen od jednotlivých kotlů.

$$F(s) = \frac{k}{s\tau_1 + 1} \cdot e^{-\tau_d s} \quad (5.1)$$

Z grafu na obrázku 5.3 popřípadě na obrázku 5.4 jsme schopni odečíst, že prodleva  $\tau_d$  mezi skokem výkonu a reakcí výstupní teploty je přibližně 50 sekund.



**Obrázek 5.3:** Naměřená teplota společného výstupu  $T_{TV}$  a výkon kaskády ze dne 21.10.2013 v době cca od 3:15 do 13:00

## 5.2.2 Pracovní bod

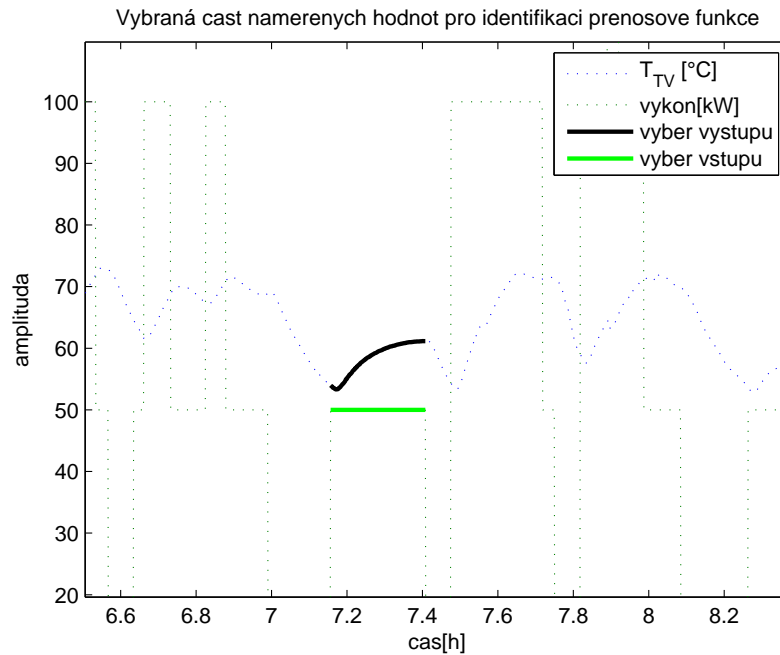
Před samotnou identifikací je třeba nejprve zvolit pracovní bod. Pro jeho určení se podíváme na podmínky, které musí splňovat lineární systém, protože, jak již bylo zmíněno, budeme aproximovat zkoumaný systém lineárním systémem 1.řádu. Pro každý lineární systém musí platit princip superpozice. Systém je možné uvažovat jako operátor, který libovolnému vstupu  $u$  přiřadí výstup  $y$ , to zapišme jako  $y = L\{u\}$ . Princip superpozice je pak dán rovnicí

$$L\{\alpha_1 u_1 + \alpha_2 u_2\} = \alpha_1 L\{u_1\} + \alpha_2 L\{u_2\} = \alpha_1 y_1 + \alpha_2 y_2, \quad (5.2)$$

pro libovolné vstupy  $u_1, u_2$ , výstupy  $y_1 = L\{u_1\}$ ,  $y_2 = L\{u_2\}$  a reálná čísla  $\alpha_1, \alpha_2$ .

Zaměříme se nyní zpět na naměřené hodnoty. Při vstupu  $u_{50} = 50 [kW]$  se teplota společné výstupní vody ustálí na hodnotě přibližně  $T_{TV50} = 61 [°C]$ . Následně vidíme, že pokud vstup  $u_{100} = 100 [kW]$ , pak se  $T_{TV}$  ustálí na přibližně  $T_{TV100} = 72 [°C]$ . Odkážeme-li se na vztah 5.2, zjevně platí  $u_1 = u_2 = u_{50}$  a  $u_1 + u_2 = u_{100}$ , ekvivalentní výstupy systému označme  $y_1 = y_2 = y_{50}$  a  $y_1 + y_2 = y_{100}$ . Označíme-li nyní pracovní bod  $y_s$ , pak pro odezvu systému platí:

$$y_{50} + y_s = 61 \quad y_{100} + y_s = y_{50} + y_{50} + y_s = 72 \quad (5.3)$$



**Obrázek 5.4:** Výběr části naměřených hodnot, pro identifikaci přechodové funkce

Odtud již jednoduše určíme

$$y_{50} = 11 \quad y_s = 50[^\circ C] \quad (5.4)$$

Nalezli jsme tedy teplotu pracovního bodu.

### 5.2.3 Aproximace přechodovou charakteristikou 1.řádu

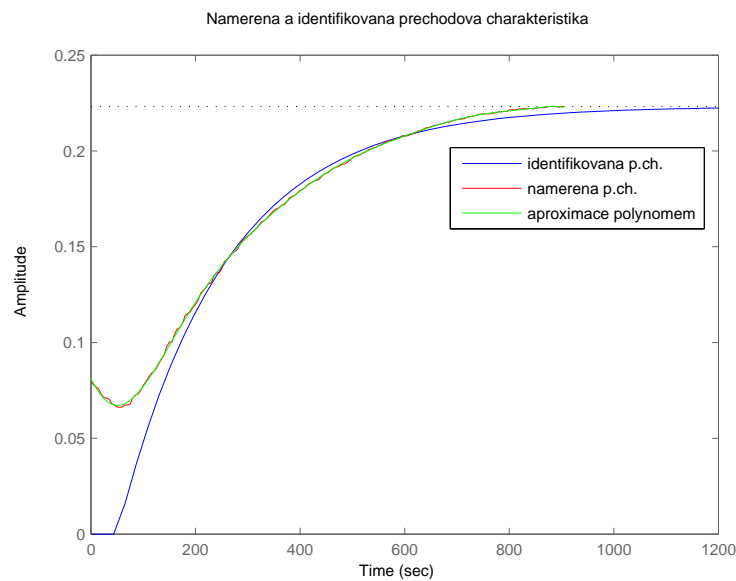
Jelikož již známe pracovní bod, můžeme nyní upravit vybranou část naměřených hodnot (Obrázek 5.4). Odečtením hodnoty pracovního bodu a dělením výstupních hodnot hodnotou vstupu znormujeme výstup na jednotkový vstup. Dostáváme graf přibližně odpovídající části přechodové charakteristiky, kterou budeme identifikovat (viz podkapitola 4.1). I když tato metoda identifikace není příliš přesná, bude nám pro získání základní představy o systému stačit.

Uvažujeme, že úpravou vyznačené části na obrázku 5.4 jsme získali část přechodové charakteristiky, tedy odezvy na jednotkový skok systému. Pak parametr  $k$  (viz vztah 5.1), neboli statické zesílení systému je přímo rovno ustálené hodnotě. V našem případě je tedy rovno poslednímu bodu normované vyznačené křivky,  $k = 0.223$ . Časová konstanta  $\tau_1$  je

pak dána hodnotou  $t_\tau$  časového okamžiku, kdy výstup nabývá hodnoty  $y(t_\tau) = 0.632k$  (viz podkapitola 4.1). Avšak v našem případě, kdy jsem již dříve z naměřených hodnot odečetli dopravní zpoždění, je  $t_\tau = \tau_1 + \tau_d$ .

Pro větší přesnost nalezení  $y(t_\tau)$  jsme zvolili aproximovat křivku polynomem 10.řádu. Po získání  $y(t_\tau) = 0.141$  můžeme odečíst  $t_\tau$ , dopočítat zbylé parametry a porovnat výslednou charakteristiku s normovanou naměřenou (Obrázek 5.5).

$$t_T = 255, \quad \tau_1 = 205, \quad k = 0.223 \quad \tau_d = 50 \quad (5.5)$$



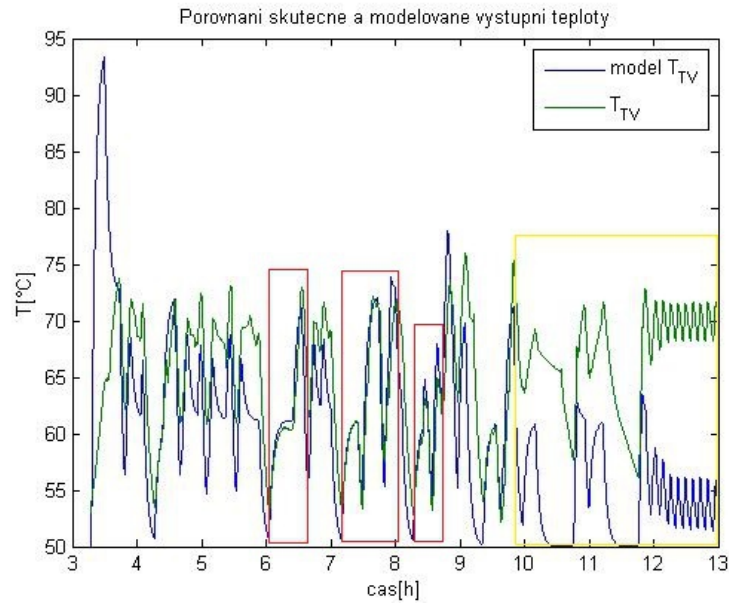
**Obrázek 5.5:** Porovnání normovaných naměřených hodnot (část přechodové charakteristiky) a identifikované přechodové charakteristiky

Porovnejme tedy nyní chování modelu v reakci na vstupní signál v podobě výkonu soustavy, jak byl naměřen, se skutečnou odezvou systému, tedy se skutečnou teplotou společné výstupní vody.

Na výsledném grafu (Obrázek 5.6) vidíme části, které se velmi dobře shodují. Oproti tomu můžeme pozorovat i části velice rozdílné. Dovolíme si tedy předložit hypotézu. Tedy, že rozdílné chování soustavy je dáno změnami zátěže otopné soustavy v průběhu měření, pokud je teplota modelu vyšší než skutečná teplota, pak je otopná soustava více zatížena, pokud je teplota modelu nižší, je menší i zátěž.

Naši hypotézu podporuje bližší pohled na dobu, kdy je odchylka modelu větší a kdy naopak menší. Velmi dobrá shoda, je v okolí identifikované oblasti, mezi 7 a osmou hodinou ranní. Předpokládáme-li z vlastní zkušenosti, že spotřeba tepla je vyšší v ranních

hodinách (řekněme mezi 6. až 10. hodinou ranní), kdy obyvatelé vstávají a sprchují se (je tedy třeba nahřát vodu do zásobníků), než v poledních hodinách. Výrazné odchylky na konci měřeného období odpovídá i fakt, že v poledne bývá venkovní teplota výrazně vyšší, než v ranních hodinách.



**Obrázek 5.6:** Porovnání modelu a naměřených hodnot. Vstupem modelu jsou skutečné naměřené hodnoty výkonu kaskády. Červeně jsou označeny části s velkou shodou. Žlutě pak části velmi rozdílné.

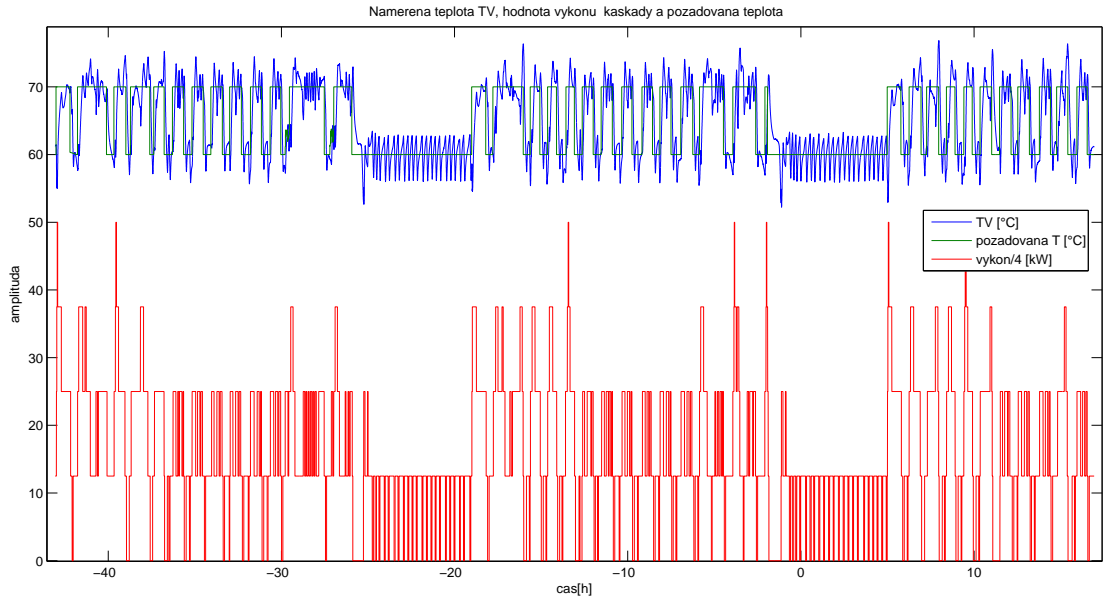
Pro další podklady k ověření naší hypotézy, prozkoumejme druhou sadu naměřených údajů.

#### 5.2.4 Druhá sada měřených dat

Tato data byla naměřena při chodu nového řídicího algoritmu. Můžeme si všimnout menšího podregulování.

Porovnáme-li původní naměřená data na obrázcích 5.2 a 5.3 a nová na obrázku 5.7, spatříme určité podobnosti. Tedy, že v ranních a večerních hodinách je třeba vyšších výkonů kaskády, než v poledních, odpoledních a nočních hodinách.

Zaměříme se dále pouze na data nová. Máme k dispozici již větší časový úsek a jak jsme již naznačili, objevují se nám trendy ve výkonech kaskády. Zjišťujeme, že výkonostní (i teplotní) křivky jsou velmi podobné vždy cca od 11:30 do 18:00 s odchylkou půl



**Obrázek 5.7:** Naměřená teplota  $t_{TV}$ , hodnota výkonu kaskády (pro přehlednost  $\frac{vykon}{4}$ ) a požadovaná teplota z období od 4:57 18.11.2013 do 16:57 20.11.2013

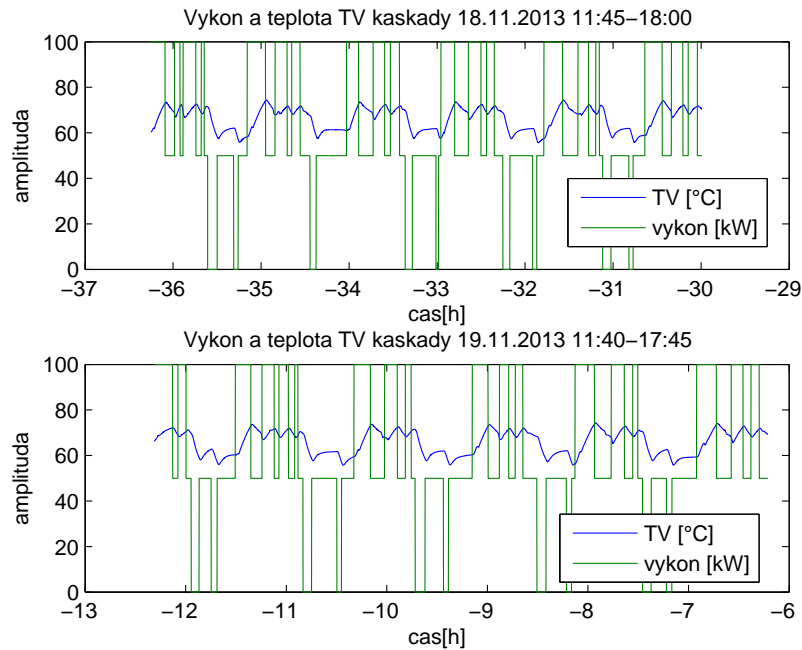
hodiny. Dále v nočních hodinách pak přibližně od 23:00 do 5:00.

Pokusíme se tedy nyní opět identifikovat model systému. Hledaný model ponechme ve tvaru systému prvního řádu s dopravním zpožděním. Jelikož však předpokládáme, že máme dostatečně dlouhý časový úsek s přibližně stejnou zátěží, použijeme k identifikaci metodu nejmenších čtverců (viz. 4.2). Díky většímu rozsahu identifikované části jakožto i díky přesnější metodě, budeme považovat tyto výsledky za více odpovídající skutečnosti. Na obrázku 5.8 vidíme vybrané části dnů, které budeme identifikovat, a na kterých budeme identifikovaná data testovat.

Nejprve je třeba znovu určit pracovní bod. Vyberme si tedy kupříkladu úsek z 18.11. od  $-33.2 [h]$  do  $-32.7 [h]$ , zde opět odměříme hodnoty při vstupu 50 [kW] a 100 [kW] a zjišťujeme, že pracovní bod bude opět přibližně  $50 [^{\circ}C]$ .

Opět přímo z grafu, jsme schopni identifikovat i dopravní zpoždění. Zjišťujeme, že je stejné jako při identifikaci první sady dat,  $\tau_d = 50[s]$ . Nyní již metodou nejmenších čtverců budeme identifikovat parametry nejprve diskrétního přenosu (vycházejícího z ARX modelu) ve tvaru

$$F(z^{-1}) = z^{-10} \frac{b_0 z^{-1}}{1 + a_1 z^{-1}}, \quad (5.6)$$



**Obrázek 5.8:** Záznam výkonů kaskády a teploty TV z 18.11. v čase 11:45-18:00 a 19.11. v čase 11:40-17:45.

kde je již zohledněno dopravní zpoždění, přičemž, jak jsme již zmínili dříve, data jsou shromažďována s periodou 5 sekund. Tedy perioda vzorkování je  $T_s = 5[s]$ . Tento diskrétní přenos následně převedeme na spojitý přenos v požadovaném tvaru (rovnice 5.1).

Pro určení parametrů  $b_0$  a  $a_1$  použijeme rekurzivní verzi metody nejmenších čtverců, jejíž vztahy pro výpočet jsou popsány v 4.2. Sice nevyužijeme plný potenciál této metody, avšak z vývoje parametrů s počtem vzorků uvidíme, jestli je zkoumaný úsek dostatečně velký (hodnota parametrů se ustálí). Dále by se v případě potřeby dala tato metody využít pro návrh adaptivního regulátoru, ten však v této práci nepoužijeme.

Výsledkem identifikace jsou hodnoty parametrů

$$b_0 = 0.0029, \quad a_1 = -0.9890 \quad (5.7)$$

Převodem diskrétního přenosu s vypočtenými parametry pomocí příkazu `d2c()` ve výpočtovém prostředí Matlab, s využitím tvarovače 0.řádu, dostaneme spojitý přenos ve tvaru

$$F(s) = \frac{b_{0c}}{s + a_{0c}} e^{-T_d s} = \frac{0.00058}{s + 0.0022} e^{-50s} \quad (5.8)$$

Po převodu na tvar 5.1 dostáváme

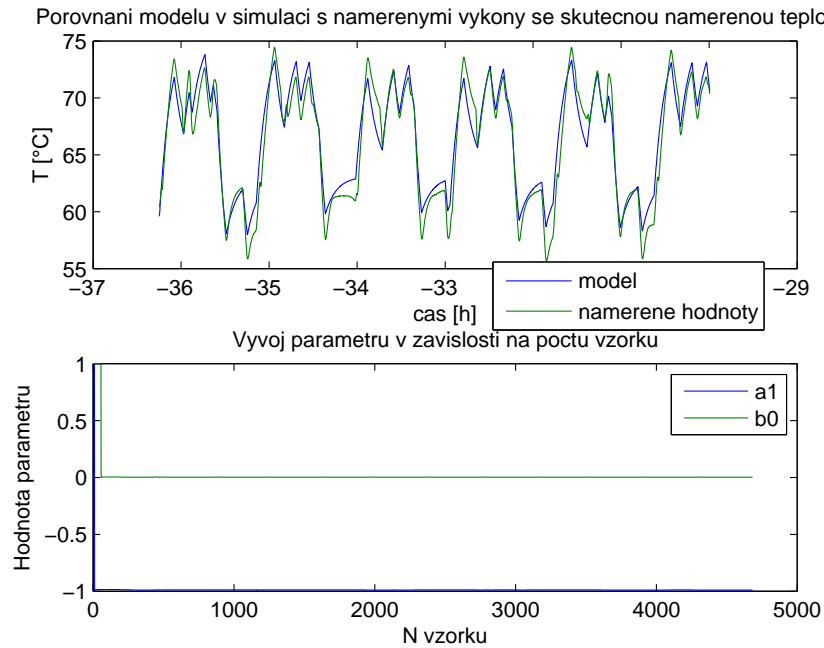
$$F(s) = \frac{0.262}{453s + 1} e^{-50s} \quad (5.9)$$



Výsledné parametry jsou tedy

$$k = 0.262, \quad T_1 = 453, \quad T_d = 50 \quad (5.10)$$

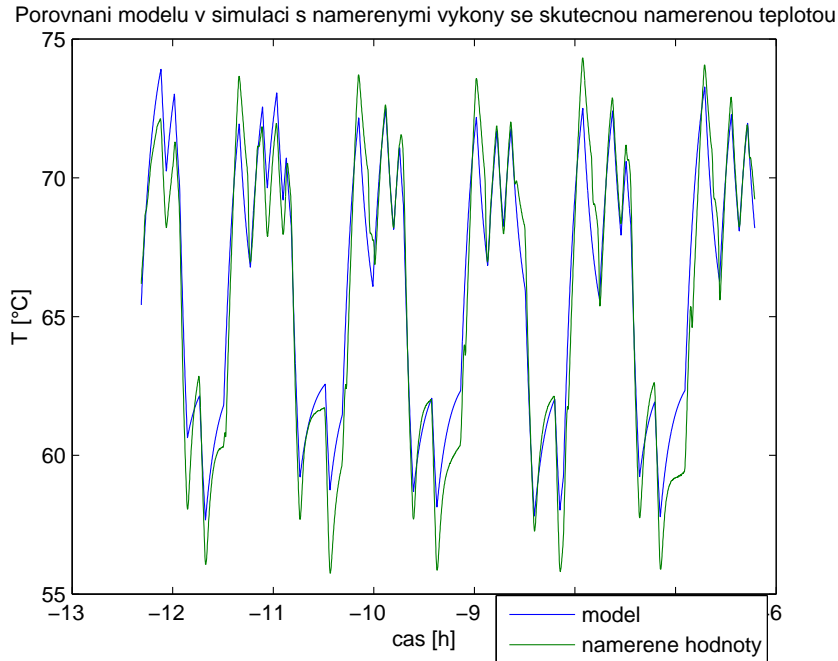
Již máme identifikovaný model a nezbývá nám tedy než ho porovnat s naměřenými daty (Obrázek 5.9).



**Obrázek 5.9:** a) Porovnání modelu a skutečných naměřených teplot z identifikované části dne 18.11.2013. Vstupem jsou naměřené výkony.  $FIT = 70.34\%$ ,  $MRE = 1.9\%$  b) Vývoj identifikovaných parametrů v závislosti na počtu vzorků

Z grafu vývoje parametrů (viz Obrázek 5.9) vidíme, že počet vzorků je více než dostatečný. K porovnání modelu a naměřených hodnot využijeme porovnávacích kritérií MRE a FIT index, které jsme již dříve popsali v podkapitole 4.3. Uvedme tedy, že hodnota FIT indexu byla okolo 70% a hodnota MRE okolo 2%.

Podívejme se nyní, zda-li tento model obdobně vyhovuje i datům z odpoledne 19.11.2013 (Obrázek 5.10). Jelikož předpokládáme, že zátěž v těchto dvou zkoumaných úsecích je přibližně stejná, měly by tomu odpovídat i hodnoty porovnávacích kritérií.



**Obrázek 5.10:** Porovnání modelu a skutečných naměřených teplot dne 19.11.2013. Vstupem jsou naměřené výkony.  $FIT = 72.7\%$ ,  $MRE = 1.8\%$

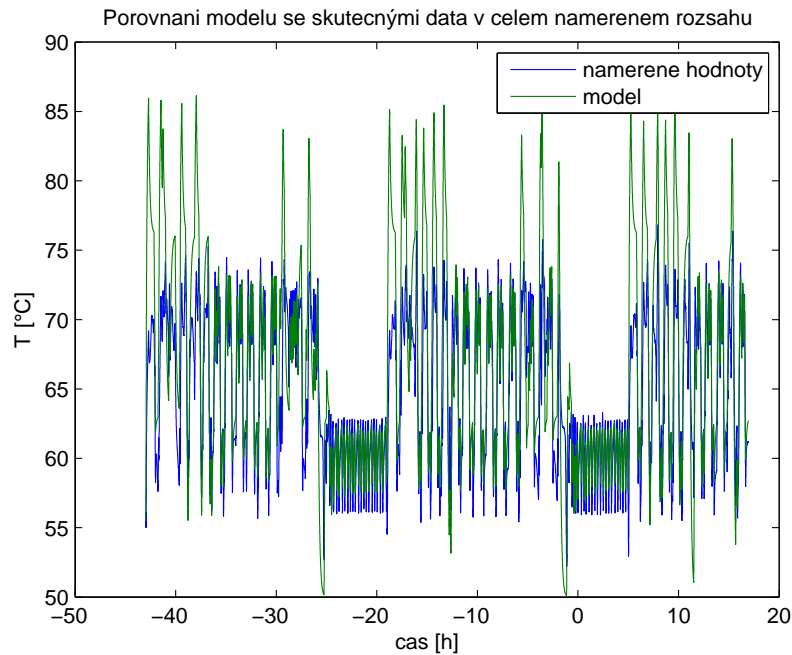
Z výsledného grafu a hodnot kritérií, FIT je přibližně 73% a MRE okolo 2%, vidíme, že výsledný model vyhovuje i této části. Ověřili jsme si tedy podobnost zátěže otopné soustavy v těchto obdobích.

Pokusíme-li se ověřit, zda-li model vyhovuje naměřeným datům v celém rozsahu (Obrázek 5.11), zjistíme, že je nedostačující (FIT okolo 7% a MRE přibližně 5%), jelikož je vytvořen pro přibližně konstantní zátěž otopné soustavy.

Je tedy zřejmé, že je třeba získat, alespoň nějakou informaci o vývoji zátěže. Protože nemáme žádnou informaci o aktuální teplotě vratné vody, o aktuálním průtoku, či jinou informaci o spotřebě tepla, bude třeba si vystačit pouze se známými informacemi.

Nejpřínosnější by mohla být informace o výkonu hořáků. Pokusíme se využít poznatků z kapitoly 4, kde jsme se zabývali pojmem spínací poměr. Spínací poměr se však dá snadno určit pouze pro jednostupňové hořáky, kde má také vypovídající hodnotu pro určení potřeby tepla. K potřebám řízení zátěží, je tedy využitelný pouze při použití jednostupňových hořáků [8]. Přesto se pokusíme o jeho využití pro alespoň hrubý odhad vývoje zátěže v námi zkoumaných datech.

Avšak mluvíme-li o využití spínacího poměru pro určení zátěže, měli bychom si vy-



**Obrázek 5.11:** Porovnání modelu a skutečných naměřených teplot v celém rozsahu 18.11.-20.11.2013.  $FIT = 7\%$ ,  $MRE = 5.1\%$

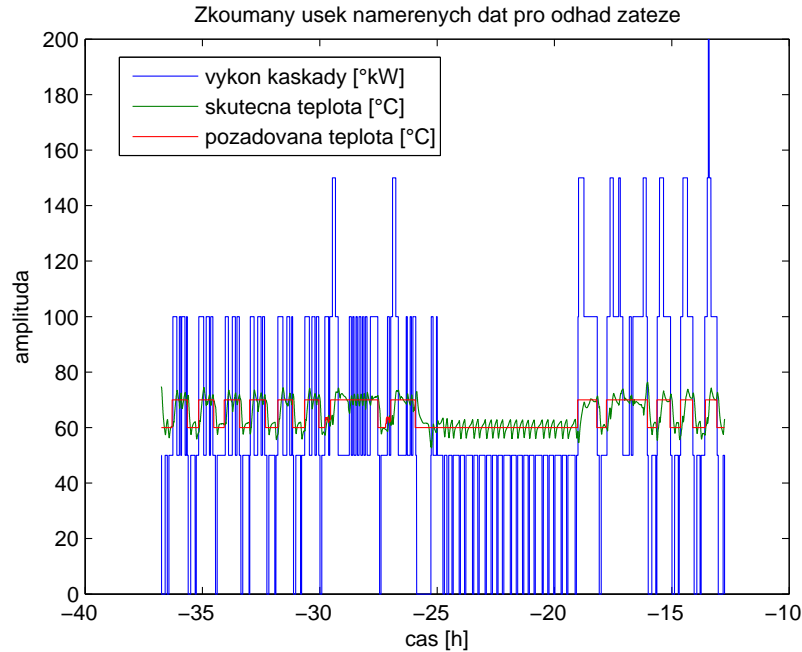
jasnit, jakým způsobem zátěž ovlivňuje náš regulační obvod. Budeme-li považovat zátěž za poruchu, je třeba také určit, kde tato porucha působí. Oba tyto problémy rozebereme v následující části.

### 5.2.5 Zátěž (potřeba tepla) otopné soustavy

Jestliže spínací poměr přímo poskytuje informaci o zátěži otopné soustavy, pak zátěž přímo působí na výkon hořáků. Budeme nadále tedy předpokládat, že zátěž bude působit jako porucha na vstupu signálu. Dodejme ještě, že aktuální zátěž kotle vyjádřená ze spínacího poměru vyjadřuje potřebný (skutečný) výkon hořáků k ohřátí topného media na požadovanou teplotu. Snad bude toto vysvětlení uchopitelnější na konci této části textu.

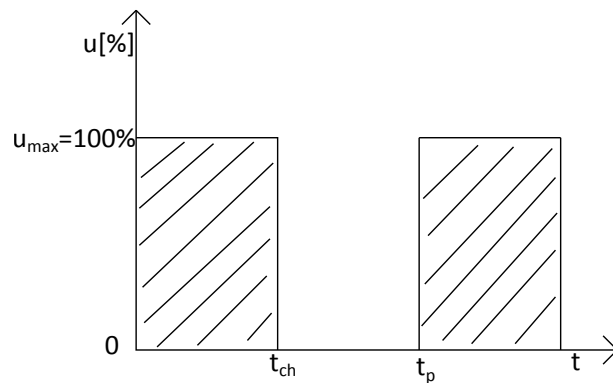
Průběh zátěže nebudeme určovat pro celý soubor naměřených dat. Pro naše účely postačí vybrat část v délce 24 hodin. Vybrali jsme si tedy oblast přibližně od 11:15 18.11. do 11:15 19.11.2013.

Nejprve si upravíme postup pro výpočet spínacího poměru. Standardní vzorec pro výpočet spínacího poměru ho udává jako poměr doby chodu hořáku ve spínacím intervalu



Obrázek 5.12: Vybraný úsek naměřených dat pro určení odhadu zátěže

ku době spínacího intervalu (viz podkapitola 3.1.2 ).



Obrázek 5.13: Integralní výpočet spínacího poměru

Při pohledu na obrázek 5.13, je zjevné, že na spínací poměr, alespoň u jednostupňových hořáků, můžeme nahlížet jako na poměr plochy pod křivkou výkonu hořáku ve spínacím intervalu ku ploše při maximálním výkonu ve spínacím intervalu. Pro diskrétní data je možné ho vyjádřit následovně:

$$\epsilon = \frac{\sum_{k=1}^{T_z} u(k)}{T_z \cdot u_{max}} \quad (5.11)$$

, kde  $u(i)$  je výkon hořáků v okamžiku  $i$ ,  $u_{max}$  je maximální výkon hořáků a  $T_z$  doba

spínacího intervalu.

Výsledná aktuální zátěž kotle  $q$  v daném spínacím intervalu, je pak vyjádřena

$$q = u_{max} \cdot \epsilon \quad (5.12)$$

Hodnota spínacího poměru je z intervalu  $\langle 0, 1 \rangle$ ,  $q$  pak z intervalu  $\langle 0, u_{max} \rangle$ . V našem případě bude  $q$  z intervalu  $\langle 0, 300 \rangle$  (viz součtový výkon kotelny  $300kW$ )

Zkoumaným signálem je nyní signál aktuálního výkonu kaskády  $u$ . Nejprve nalezneme okamžiky náběžných hran tohoto signálu, poté okamžiky všech hran (náběžných i sestupných). Pro výpočet spínacího poměru následně využijeme vzorec 5.11, kde  $T_z$  bude dán dobou mezi dvěma náběžnými hranami. Dodejme, že tento výpočet spínacího poměru pro víceúrovňové hořáky, není výpočtem spínacího poměru v pravém slova smyslu. Je určitou heuristikou, protože spínací poměr je popsán pouze pro jednostupňové hořáky. Zatím by se mohlo zdát, že výpočet spínacího poměru je stejný pro jednostupňové i víceúrovňové hořáky, avšak již nyní se můžeme dopouštět nepřesností při situaci, kdy následují dvě či více náběžných hran hned po sobě. Dalším momentem vzniku možných nepřesností, jsou dvě a více sestupných hran. V tomto druhém případě mohou vznikat větší nepřesnosti, jelikož by byl potlačen vliv nejvyššího aktuálního stupně hořáku. Pokusíme se tedy vylepšit náš odhad spínacího poměru úpravou na sestupných hranách.

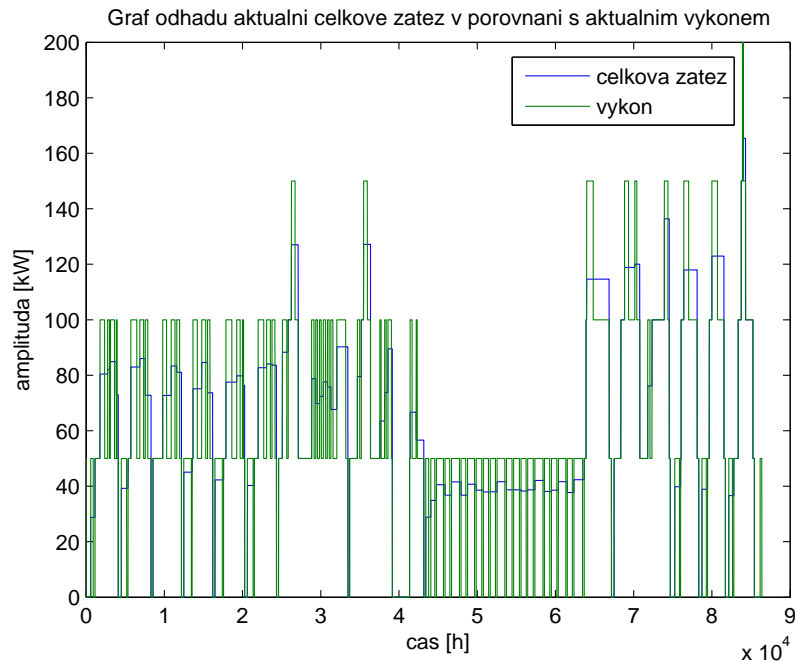
I nadále budeme uvažovat stejný vzorec pro výpočet spínacího poměru. Budeme však měnit délku spínacího intervalu. Pokud se tedy objeví dvě bezprostředně po sobě jdoucí sestupné hrany volíme nejprve spínací interval  $T_z$  jako dobu mezi časem poslední náběžné hrany a poslední sestupné hrany (tedy druhé v bezprostředním pořadí). Do pomocné proměnné si poznačíme `true`, že se objevila dvojice sestupných hran. Druhou částí je pak určení následného  $T_z$ , který bude dobou mezi poslední sestupnou a jakoukoliv bezprostředně následující hranou.

Pokud je následující hrana znovu sestupná, opakujeme druhou část postupu, tedy  $T_z$  bude opět dobou mezi poslední sestupnou a bezprostředně následující hranou.

Pokud následující hranou bude náběžná hrana, do pomocné proměnné uložíme `false` a spínací poměr vypočítáváme standardním způsobem s  $T_z$  jako s dobou mezi dvěma náběžnými hranami.

Touto heuristikou dostaneme náš odhad vývoje spínacího poměru pro zkoumanou oblast. Pokud tuto křivku vynásobíme dle vzorce 5.12 maximálním výkonem kaskády, dostáváme graf námi odhadnuté aktuální zátěže ve zkoumané časové oblasti (Obrázek 5.14). Samozřejmě i přes toto zlepšení je zřejmé, že se dopouštíme výrazné chyby, tedy že náš odhad bude stále velmi nepřesný. Bohužel však s údaji, které máme k dispozici

nejsem schopni dosáhnout lepšího výsledku.



**Obrázek 5.14:** Vývoj odhadnuté aktuální celkové zátěže v porovnání s aktuálním výkonem kaskády

Podařilo se nám nalézt hrubý odhad aktuální zátěže otopné soustavy na zkoumaném úseku měření. Avšak nalezená zátěž nemůže být přímo použita jako výše zmíněná porucha na vstupu systému spolu s naším modelem. Je třeba zahrnout fakt, že jsme neidentifikovali systém při nulové zátěži. Tedy, aby námi odhadnutá zátěž byla použitelná jako porucha na vstupu s naším modelem, je třeba od ní odečíst hodnotu zátěže, při které byl systém identifikován. Je tedy třeba zjistit, jaký je třeba výkon, abychom přivedli výstup modelu systému na požadovanou teplotu. Zjištěný výkon následně odečteme z odhadnuté zátěže.

Samozřejmě tento výkon bude rozdílný pro požadovanou teplotu 60 [°C] a 70 [°C], je tedy třeba odčítat ve vhodné okamžiky střídavě tyto výkony.

Pro zjištění hledaných výkonů je třeba mírně předběhnout následující kapitolu návrhu regulátoru. Z publikace [3] zjišťujeme, že nejvhodnějším přístupem řízení bude použití PI regulátoru. K našemu účelu tedy navrhneme libovolný PI regulátor tak, aby uzavřená smyčka byla stabilní. Budeme sledovat, kde se ustálí hodnota vstupu pro obě požadované teploty.

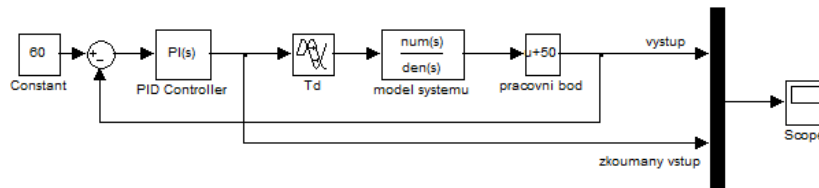
Experimentálně jsme zvolili parametry PI regulátoru ve tvaru

$$F_{PI}(s) = K \cdot \left(1 + \frac{1}{T_I s}\right) = 1 + \frac{1}{100s} \quad (5.13)$$

, pro použití PI regulátoru v prostředí Simulink, jsou pak parametry  $P = 1$ ,  $I = 0.01$  pro regulátor ve tvaru

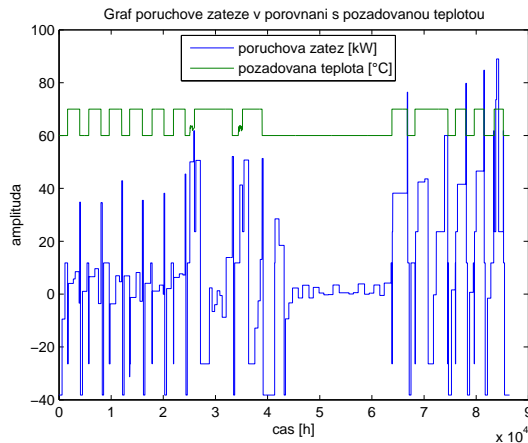
$$F_{PI}(s) = \left( P + I \frac{1}{s} \right), \quad (5.14)$$

kde  $P$  je ekvivalentem proporcionální konstanty  $k_p$  a  $I$  integrační konstanty  $k_I$  (viz podkapitola 2.1.5).



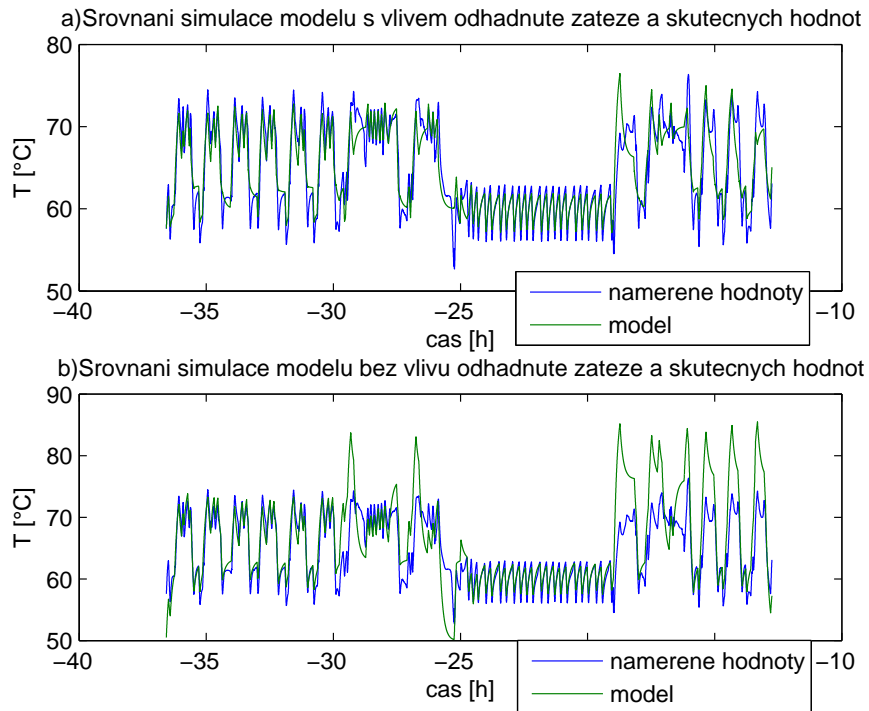
**Obrázek 5.15:** Schema simulace pro zjištění potřebného výkonu modelované kaskády pro regulaci na požadované teploty

Zjišťujeme, že pro náš model systému, je třeba výkon přibližně  $38.2 [kW]$  pro regulaci na  $60 [^{\circ}C]$  a  $76.4 [kW]$  na  $70 [^{\circ}C]$ . Po odečtení těchto hodnot, pro odpovídající úseky požadované teploty, od odhadnuté zátěže dostáváme následující zátěž (Obrázek 5.16), řekněme jí "poruchová".



**Obrázek 5.16:** Graf "poruchové" zátěže otopné soustavy v porovnání s požadovanou teplotou

Tuto zátěž již můžeme použít, jako poruchu na vstupu modelu. Porovnejme nakonec model s vlivem záporné hodnoty "poruchové" zátěže na vstupu systému s naměřenými hodnotami na vybraném úseku měření (Obrázek 5.17). Vyhodnocením porovnávacích



**Obrázek 5.17:** a) Porovnání chování modelu s vlivem zátěže s naměřenými hodnotami se stejnými vstupními signály ( $FIT = 57\%$ ,  $MRE = 2.52\%$ ).  
 b) Porovnání chování modelu bez vlivu zátěže s naměřenými hodnotami se stejnými vstupními signály.  $FIT = 12.8\%$ ,  $MRE = 4.68\%$

kriterií zjišťujeme výrazné zlepšení oproti porovnání bez vlivu zátěže. FIT index je nyní přibližně 57% a hodnota MRE kritéria přibližně 2.5%. Původní hodnoty na daném úseku jsou  $FIT = 13\%$ ,  $MRE = 4.7\%$ .

Přestože odhad zátěže je velmi hrubý a značně nepřesný, dospěli jsme k názoru, že byl vytvořen dostatečně vhodný model.



# Kapitola 6

## Návrh řízení

V následující kapitole nejprve vybereme vhodný způsob sekvenčního řízení spínání kotlů, navrhne postup jeho realizace a následně toto řízení realizujeme a otestujeme na vytvořeném modelu.

### 6.1 Popis návrhu

#### 6.1.1 Výběr metody řízení

V části 3.2 jsme popsali základní používané způsoby pro řízení spínání kotlů v kaskádě, blíže popsané v textech [3] a [9]. Z těchto přístupů nyní vybereme jeden, podle kterého navrhne řídicí algoritmus.

Nejprve vzhledem k informacím o zkoumané kotelně a snímaným veličinám vyloučíme přímo některé přístupy.

Víme, že ani jeden z kotlů nemá modulační hořáky, tedy hned na začátku můžeme vyloučit použití řízení podle zátěže hořáků (viz podkapitola 3.2.7).

Stejně tak rychle můžeme vyloučit i řízení podle teploty vratné vody (podkapitola 3.2.5) i řízení podle teploty přívodní a vratné vody (viz podkapitola 3.2.6), jelikož nemáme informaci o aktuální teplotě vratné vody.

Jelikož jednotlivé kotle nemají vlastní regulátory teploty a obsluhujeme kotle s vícestupňovými hořáky nepoužijeme ani řízení podle zátěže a spínacího poměru (viz podkapitola 3.2.3). Již dříve jsme zmínili, že tento způsob řízení má smysl pouze při řízení jednostupňových hořáků u zdroje tepla.

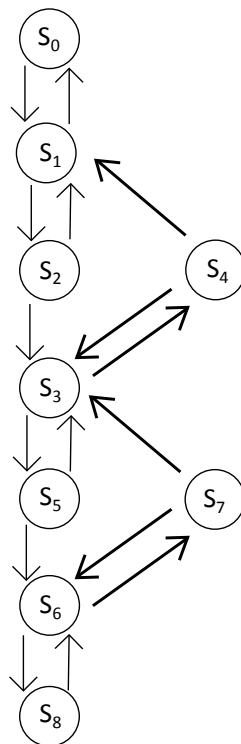
Řízení podle venkovní teploty, můžeme také vyloučit, jelikož kaskáda není využívána

z 90% k vytápění, ale také k ohřevu teplé užitkové vody (viz podkapitola 3.2.1).

V úvahu tedy připadají dva způsoby: řízení podle teploty kotlové vody a řízení podle přívodní vody do spotřebitelských okruhů (viz podkapitoly 3.2.2 a 3.2.4). K těmto dvěma bychom již měli mít potřebné snímače. Nyní je však rozhodujícím faktorem fakt, že v kotelně je v provozu nadřazený algoritmus, který vypočítává požadovanou teplotu přívodní vody do spotřebitelských okruhů a naším úkolem, je řízení kaskády právě na tuto požadovanou teplotu. Není tedy důvod, abychom spínání kotlů neřídili podle regulované veličiny.

Nadále tedy budeme navrhovat řízení kaskády kotlů podle teploty přívodní vody do spotřebitelských okruhů. Naším hlavním požadavkem bude prodloužení doby chodu kotlů. Druhotným, pak udržení regulační odchylky do 5 [°C].

### 6.1.2 Sekvenční spínač hořáků



**Obrázek 6.1:** Schema fungování spínače hořáků

V podkapitole 3.2.4, bylo zmíněno, že velmi vhodné je při tomto způsobu řízení využití PI regulátoru se spínačem jednotlivých stupňů kotlů. Jelikož tento přístup zvyšuje četnost spínání hořáků, použijeme v návrhu i časový omezovač vypínání jednotlivých kotlů.

Standardně by se v závislosti na požadovaném zvýšení výkonu postupně zapnuly 1. a 2.stupeň primárního kotle, následně postupně oba stupně druhého kotle v pořadí a v případě potřeby i oba stupně třetího kotle. Při postupném vypínání by byl průběh ve smyslu poslední zapnutý stupeň je prvním vypnutým stupněm. Tedy pokud by se zvýšila potřeba výkonu při zapnutém druhém stupni prvního kotle, zapnul by se první stupeň druhého kotle. Pokud by se pak potřeba snížila, druhý kotel by se vypnul. Jelikož naším požadavkem při řízení bude prodloužení doby chodu kotlů, tedy co nejmenší počet vypnutí a zapnutí, navrhne se spínač, který by nejprve snížil výkon prvního kotle na první stupeň a až při dalším poklesu potřeby topného výkonu by vypnul druhý kotel.

Je třeba navrhnout logický konečný automat s výše popsanou funkcí. Navrženou funkčnost takového automatu znázorňuje Obrázek 6.1.

**Tabulka 6.1:** Tabulka stavů automatu spínače hořáků

Stav	Reprezentace
$S_0$	0
$S_1$	[1,50]
$S_2$	[1,100]
$S_3$	[1,100;2,50]
$S_4$	[1,50;2,50]
$S_5$	[1,100;2,100]
$S_6$	[1,100;2,100;3,50]
$S_7$	[1,100;2,50;3,50]
$S_8$	[1,100;2,100;3,100]

Ten ukazuje možné přechody mezi stavy při zvýšení a snížení potřeby výkonu. Význam jednotlivých stavů určuje tabulka 6.1, kde [1,50] značí, že první kotel topí s 50 % výkonem (50 [kW]).

Realizaci takového logického automatu provedeme s využitím bloků pro průmyslovou regulaci řídicího systému REX. Avšak pro rychlejší posouzení výsledků s použitím modelu, budeme tyto bloky používat v prostředí Simulink.

### 6.1.3 Využití bloky systému REX

Popišme si nyní některé bloky systému REX, které využijeme na sestavení algoritmu řízení. Veškeré bloky jsou blíže popsány v [4].

**FOPDT** Jedná se o blok modelu systému 1. řádu s dopravním zpožděním. Reprezentuje diskrétní simulátor systému vzniklého přesnou diskretizací spojitého systému popsaného přenosovou funkcí (6.1) s periodou  $T_s$ .

$$P(s) = \frac{k_0}{(\tau \cdot s + 1)} \cdot e^{-del \cdot s} \quad (6.1)$$

Parametry  $k_0$ ,  $\tau$  a  $del$  popořadě představují statické zesílení systému, časovou konstantu a dopravní zpoždění v sekundách.

**ATMT** Blok automatu pro sekvenční řízení realizuje konečný automat. Aktuální stav automatu je kódován pomocí výstupů bloku (Q0-Q15). Vstupem bloku jsou podmínky přechodu (C0-C15), přičemž musí být splněno, že pokud podmínka platí má hodnotu 1 (on) pokud neplatí má hodnotu 0 (off). Funkce automatu je zadávána tabulkou 6.2, ve které má každý řádek význam: Pokud jsme ve stavu  $Si \wedge$  je splněna  $Ci \Rightarrow$  přejdi do stavu  $NSi$ .

**Tabulka 6.2:** Tabulka stavů a přechodů pro blok ATMT

Aktuální stav	Podmínka přechodu	Následující stav
S0	C0	NS0
S1	C1	NS1
S2	C2	NS2

Pokud chceme z jakéhokoliv stavu přejít okamžitě do stavu S0, je třeba přivést hodnotu on na vstup R1.

Tabulka stavů a přechodů bloku ATMT lze získat z popisu automatu v jazyce SFC. Součástí bloku je SFC editor.

**TIMER** Blok vícefunkčního časovače umožňuje například vygenerovat impuls délky určené hodnotou parametru  $pt$  [s], který začíná náběžnou hranou vstupního signálu  $U$ . Přičemž další náběžné hrany  $U$  jsou během trvání pulzu ignorovány.

**PIDU** Jedná se o základní blok systému REX pro tvorbu úplného PID (P, I, PI, PD, PID, PI+S) regulátoru. V automatickém režimu realizuje řídicí zákon PID regulátoru se dvěma stupni volnosti ve tvaru

$$U(s) = \pm K \{ bW(s) - Y(s) + \frac{1}{T_I s} [W(s) - Y(s)] + \frac{T_d s}{N} [cW(s) - Y(s)] \} + Z(s), \quad (6.2)$$

kde  $U(s)$ ,  $W(s)$ ,  $Y(s)$  a  $Z(s)$  jsou pořadě Laplaceovy transformace řídicí veličiny, požadované hodnoty, regulované veličiny a dopředné vazby. Parametry  $K$ ,  $T_I$ ,  $T_d$ ,  $N$ ,  $b$  a  $c$  pak určují zesílení regulátoru, integrační a derivační časovou konstantu, parametr  $N$  filtru derivační složky a váhové faktory pro proporcionální a derivační složku.

**REL** Blok relační operace dvou signálů vyhodnocuje binární relaci dvou vstupních signálů. Výstup je on (1), pokud relace platí, a off (0), pokud neplatí. Možné relace jsou

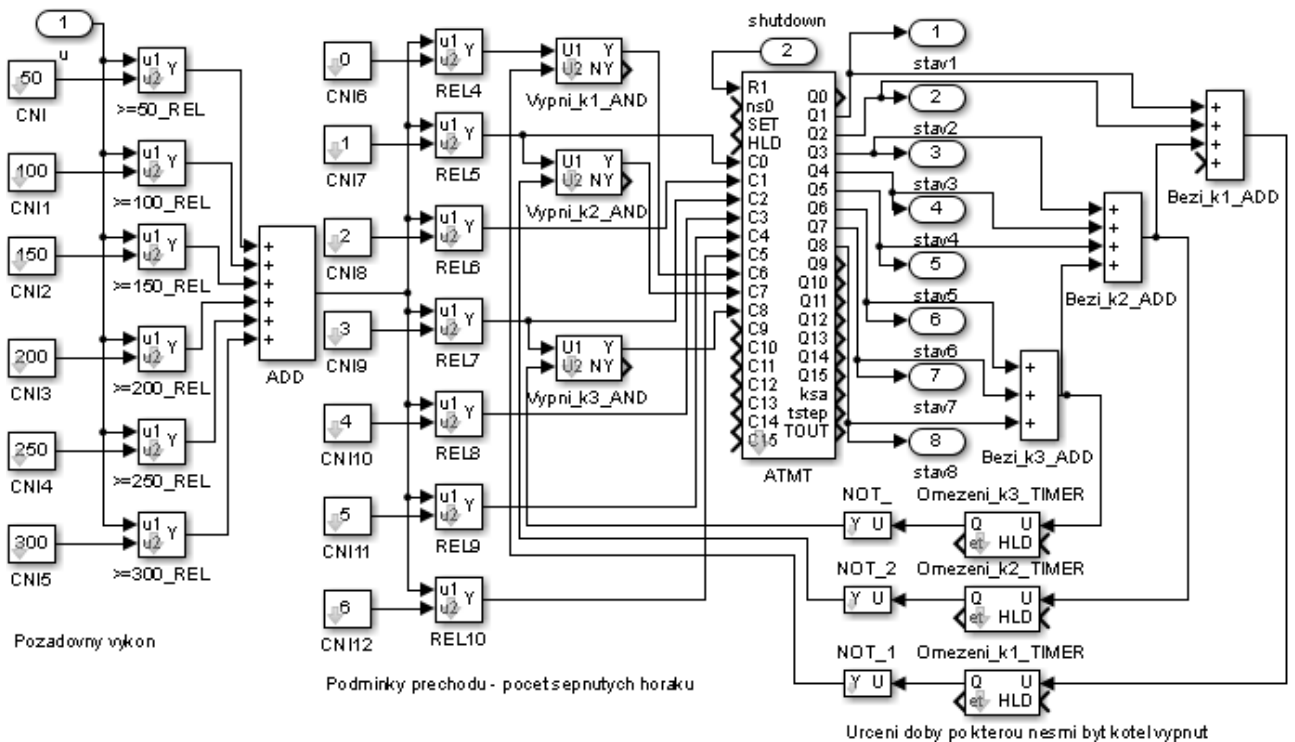
- rovnost(==)
- nerovnost(!=)
- menší než (<)
- větší než (>)
- menší nebo rovno (<=)
- větší nebo rovno (>=)

## 6.2 Vlastní realizace návrhu

V této části nejprve zrealizujeme navržený konečný automat pro spínání hořáků kotlů spolu s omezovačem doby vypínání kotlů, jež zaručí minimální dobu chodu kotle. Posledním bodem této části bude naladění PI regulátoru a ověření funkčnosti na modelu. Řízení budeme realizovat s pomocí řídicího systému REX, avšak pro snazší simulaci využijeme pouze knihovnu REXlib, tedy bloky systému REX, v simulačním prostředí Simulink. Nebudeme tedy muset provádět simulace v reálném čase.

### 6.2.1 Návrh automatu přepínání hořáků

Základem našeho mechanismu spínání (zobrazeném na obrázku 6.2) bude výše zmíněný blok ATMT. Již jsme si dříve určili jednotlivé stavy automatu a možnosti jejich přechodů, je však stále třeba určit podmínky přechodů. Víme, že maximální výkon kotleny je 300 [kW], jak je již zřejmé z předešlých částí této práce, uvažujeme, že každý sepnutý stupeň kotlů představuje  $\frac{1}{6}$  výkonu celé soustavy. Základem pro podmínku přechodu tedy bude



Obrázek 6.2: Schema subsystému přepínače hořáků Automat

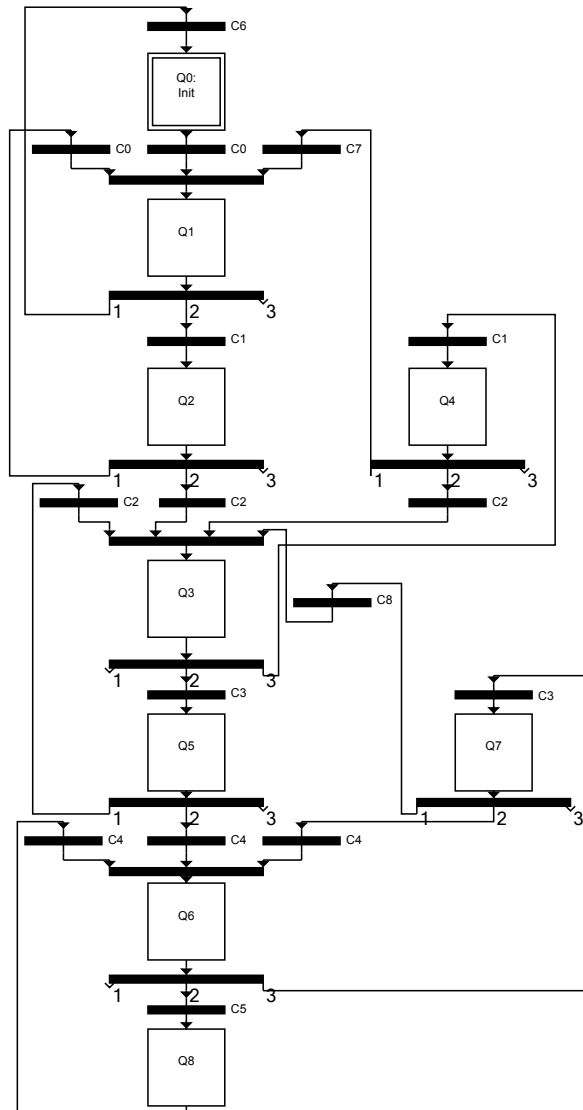
potřeba výkonu dána řídicím signálem z výstupu PI regulátoru v rozsahu 0-300 [kW]. Náš subsystém Automat tedy nejprve vstupní signál porovná s hodnotami výkonu jednotlivých sepnutých stupňů soustavy (50, 100, 150, 200, 250, 300 [kW]). Pokud je potřebný výkon větší než daný stupeň, pak porovnávací blok REL s relací  $\geq$  posílá dále hodnotu 1. Součtový blok sečte výstupy jednotlivých porovnávacích bloků, jeho výstupem je tedy, kolik stupňů (hořáků) kaskády má být spuštěno.

Podmínky přechodu C0-C5 jsou následně dány aktuální potřebou spuštěných hořáků. Tedy pokud je třeba 1 hořák (stupeň), pak na C0 je přivedena hodnota 1, na všechny ostatní podmínky 0. Jsou-li potřeba tři hořáky, je hodnota 1 přivedena na C2 a opět nula na zbylé.

Podmínky C6-C8 jsou navíc rozšířeny o test minimálního času chodu kotle. Tedy pro C6 musí být splněno, že je třeba 0 hořáků a uplynula minimální doba zapnutí kotle 1, ale o jejím určení a kontrole se zmíníme později.

Pro nouzové vypnutí všech kotlů je jedním ze vstupů tohoto subsystému vstup Shutdown, jehož hodnota je přivedena na vstup R1 bloku ATMT.

Samotná funkce automatu, tedy bloku ATMT je získána z popisu v jazyce SFC (Obrázek 6.3), podle grafu (Obrázek 6.1).



Obrázek 6.3: Popis automatu v jazyce SFC

Výstupy tohoto subsystémů jsou tedy výstupy 1-8 určující zda-li je daný stav aktivní (hodnota 1) či neaktivní (hodnota 0).

Přejdeme nyní k blokům starajícím se o kontrolu minimální doby spuštění kotle. Základem je výše představený blok TIMER. Nejprve je třeba získat signál, který je 1 pokud je daný kotel spuštěný a 0 pokud je vypnutý. K tomu jsme použili součtové bloky *Bezi\_ki\_ADD* (stejně dobře by byly využitelné i bloky logického součinu). Základem je si uvědomit, že kotel k3 je v provozu ve stavech 7-8, kotel k2 v 3-8 a k1 ve stavech 1-8. Signál z těchto bloků přivedeme na blok TIMER, ten pokud zaznamená, že byl kotel spuštěn (náběžná hrana), vygeneruje výstupní pulz s hodnotou 1 určené délky. V našem

případě jsme určili délku tohoto pulzu 600 [s]. Chceme, aby v době, kdy je spuštěn pulz nebylo možné kotel vypnout. Minimální doba běhu každého kotle je tedy 10 minut. Avšak vzhledem k tomu, že jsem pro podmínky C6-C8 využili blok AND, je třeba výstup z TIMERu negovat. Toto časové omezení je vždy na první stupeň každého kotle, druhý stupeň může vypínat bez omezení, jelikož při sepnutí druhého stupně jsou téměř nulové úniky plynu a hodnoty škodlivin vypouštěných do ovzduší jsou ustálené. Avšak u prvního stupně jsou, kvůli zachování správného poměru vzduchu a plynu, úniky a hodnoty vypouštěných spalin značné.

Již máme informaci o tom, který stav je aktivní a nastaveno jejich správné přepínání. Nyní je třeba upravit signály k jejich použití jako vstup řízeného systému.

**Úprava signálu na hořáky** Jak víme, náš model je sestaven pro vstupní signál v podobě výkonu topné kaskády v kW. Zatím je výstupem našeho regulátoru série logických signálů. K jejich převedení slouží subsystém Hořáky. Předvedme si jeho funkci na příkladě. Víme, že primární kotel má výkon 50 [kW] ve stavech 1, 4. Vynásobíme-li součet signálů z těchto tří stavů hodnotou 50, pak, jelikož je aktuálně aktivní vždy jen jeden, dostáváme na výstupu hodnotu topného výkonu spuštěného prvního stupně primárního kotle.

Druhý stupeň primárního kotle je zapnut ve stavech 2, 3, 5, 6, 7 a 8. Součet tentokrát vynásobíme 100, výkon je v tomto případě 100 [kW]. Součtem výstupních signálů z bloků 1 50 a 1 100 dostaneme vždy momentální výkon primárního kotle (vždy je nenulová maximálně jedna větev). Obdobně postupujeme i u zbylých kotlů.

Jedním s výstupů je informace o aktuálním výkonu jednotlivých kotlů, druhým (řídícím) je výkon celé soustavy.

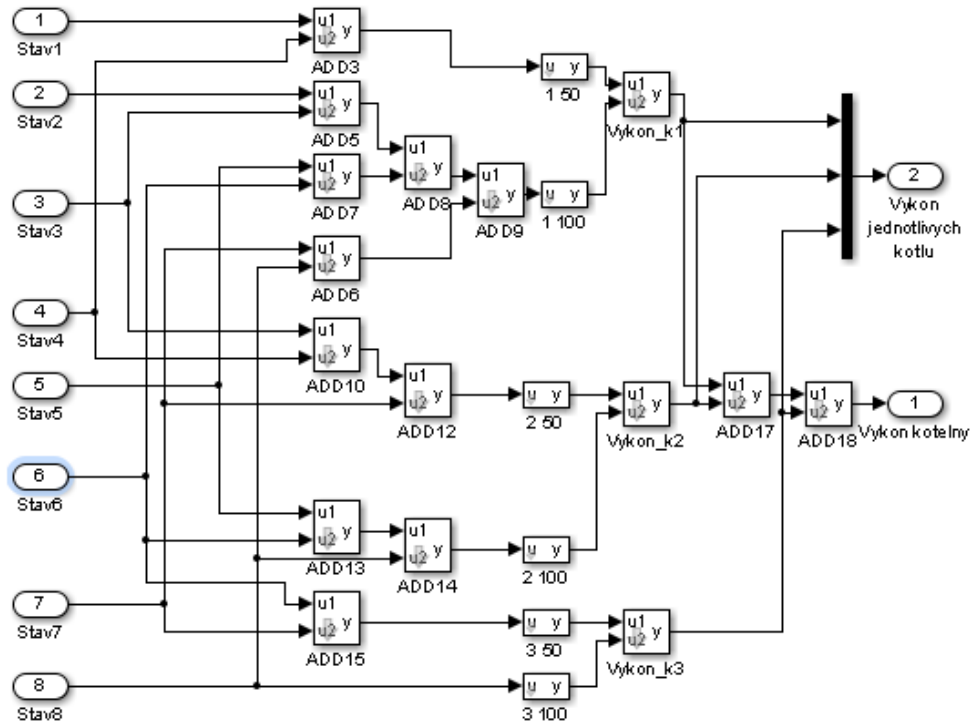
## 6.2.2 Ladění PI regulátoru

Přestože bude PI regulátor řídit systém se sekvenčním přepínačem, budeme ho ladit na modelu systému, tedy jako kdyby na řízený systém působil přímo řídicí signál z regulátoru neovlivněný sekvenčním přepínačem.

Jedná se tedy o návrh PI regulátoru pro systém prvního řádu s dopravním zpožděním. Použijeme k tomu internetový nástroj [www.PIDlab.com](http://www.PIDlab.com) popsany v [19], který využívá metodu tvarování Nyquistovy křivky. Naším cílem je nejmenší možná reakce na poruchu systému a zároveň s málo agresivní reakcí PI regulátoru.

S nalezenými parametry jsme dosáhli robustnosti v zesílení  $G_m = 5$  a robustnosti ve





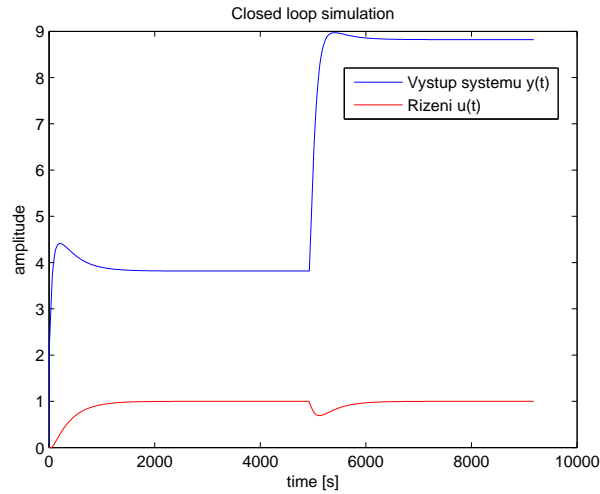
**Obrázek 6.4:** Schema subsystému Hořáky pro převod logických signálů na signály výkonu kotlů

fázi  $P_m = 68^\circ$ . Nalezené parametry regulátoru (viz vztah 6.3) jsou tedy  $K = 10.628$ ,  $T_I = 377.64$  a postupným snížením parametru  $b$  na hodnotu  $b = 0.2$  (tedy využitím 2DoF regulátoru) jsme docílili nízkého překmitu řízení  $u(t)$  (Obrázek 6.5).

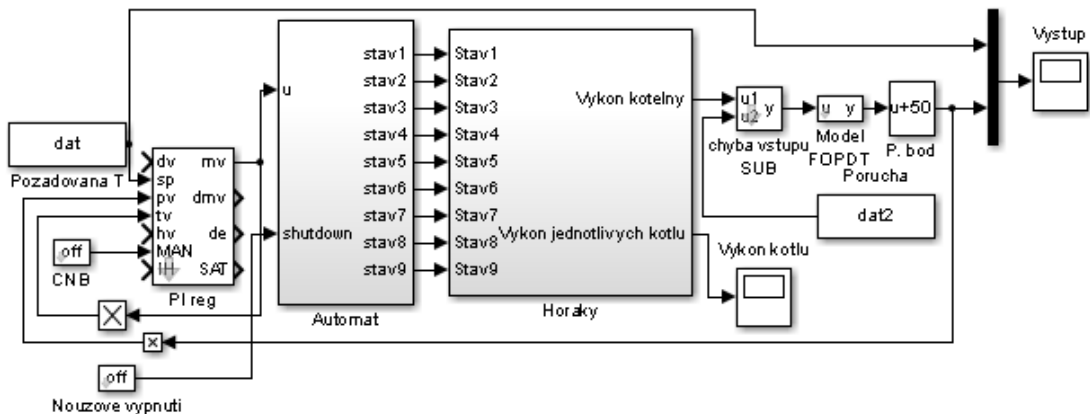
$$U(s) = \pm K \left\{ bW(s) - Y(s) + \frac{1}{T_I s} [W(s) - Y(s)] \right\} \quad (6.3)$$

### 6.3 Simulace

Již jsme si objasnili téměř všechny důležité bloky, které v simulaci využijeme. Doplňme ještě, že model systému bude reprezentován blokem FOPDT. Celé simulační schéma (Obrázek 6.6), obsahuje navíc i uvažovanou poruchu na vstupu systému.

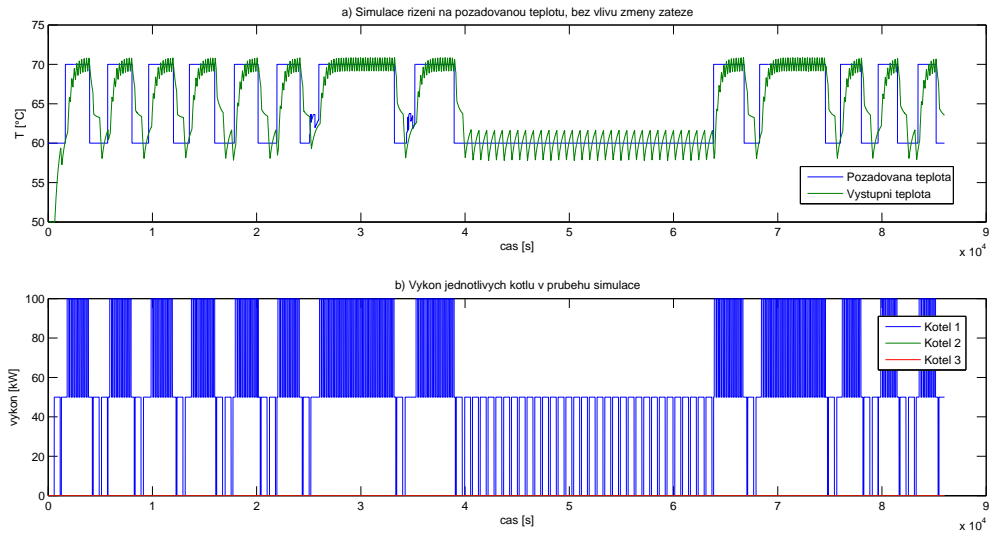


**Obrázek 6.5:** Nižší křivka vyjadřuje přechodovou charakteristiku uzavřené smyčky systému s navrženým regulátorem s reakcí na poruchu. Horní křivka hodnoty řízení  $u(t)$ . Hodnota poruchy je -4.



**Obrázek 6.6:** Celé simulační schéma navrženého řízení a modelu systému

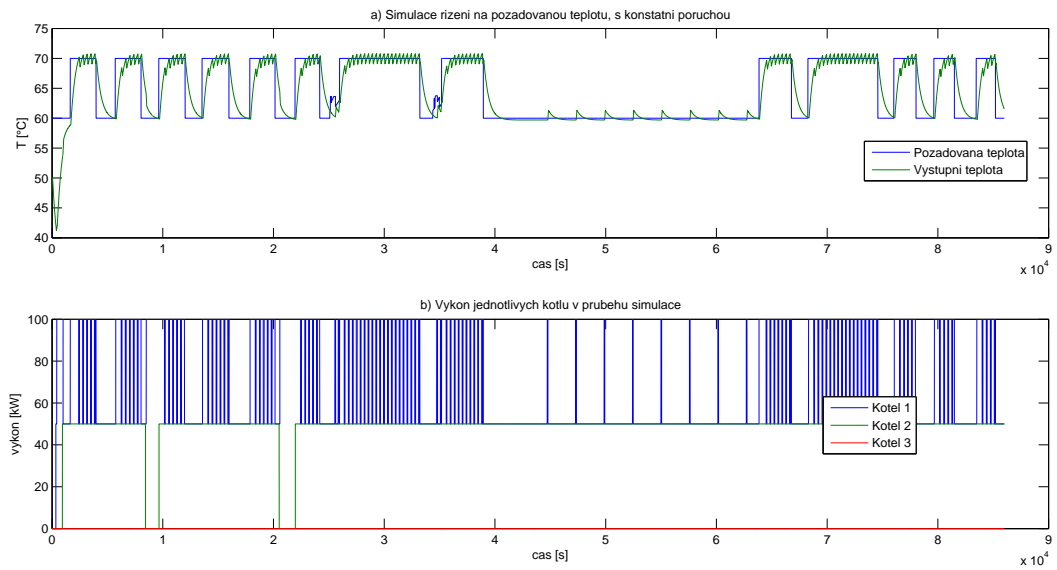
Simulaci budeme provádět s daty, pro která jsme odhadli zátěž, přibližně od 11:15 18.11. do 11:15 19.11.2013. Nejprve si zobrazme výsledek simulace, pokud nebudeme uvažovat zátěž (Obrázek 6.7). Můžeme zde pozorovat, že zatímco spínání a vypínání druhého stupně primárního kotle je rychlé, první stupeň se vypíná až po uplynutí požadované minimální doby chodu. Povšimněme si navíc, že bez vlivu poruchy je maximální přeregulování kolem  $2^{\circ}\text{C}$ , které je navíc způsobeno minimální dobou chodu kotle. Avšak v naší práci je přesná regulace až druhotný cíl. V praxi bývá obvykle povoleno přeregulování do  $5^{\circ}\text{C}$ .



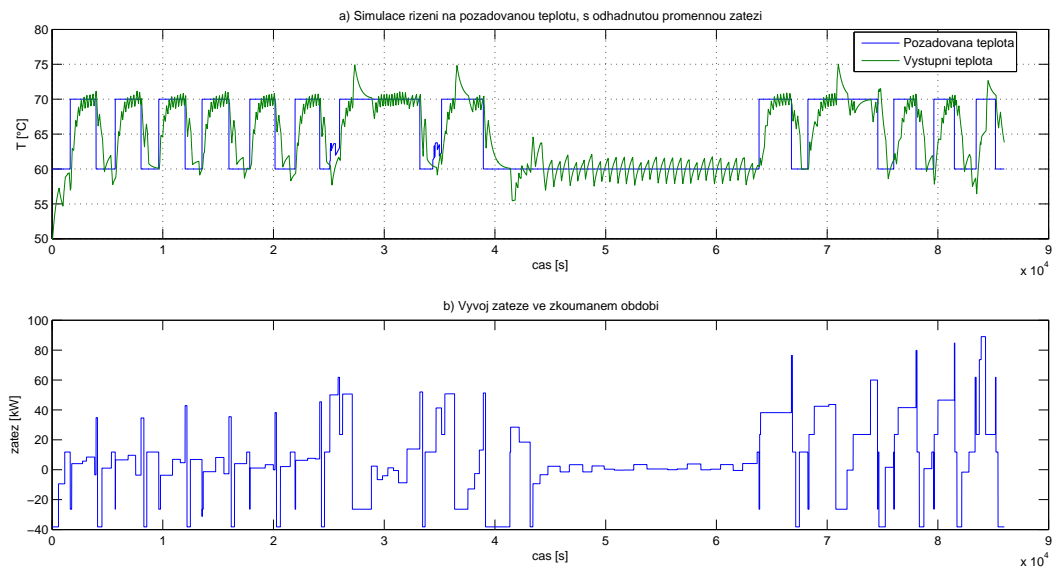
**Obrázek 6.7:** a) Simulace řízení kaskády kotlů na požadovanou teplotu přívodní vody do systému (bez uvažování změny zátěže). b) Výkony jednotlivých kotlů soustavy v průběhu simulace.

Uvažujme nyní i poruchu, tedy změnu zátěže. Nejprve mějme konstantní poruchu s hodnotou 63 [kW] a sledujme vývoj simulace (Obrázek 6.8). Vidíme, že začal spínat i druhý kotel. Je také patrné, že náš přepínač stupňů funguje korektně, jelikož nejdříve vypíná druhý stupeň prvního kotle a až poté první stupeň druhého. Je také zřejmé, že se tím prodlužuje doba chodu druhého kotle a nemusí být využívána pojistka v podobě minimální doby chodu.

V poslední simulaci se podívejme, jak se bude řízený systém chovat v případě, kdy jako poruchu přivedeme odhadnutou změnu zátěže z podkapitoly 5.2.5 (Obrázek 6.9). Maximální přeregulování a podregulování, je ve stanovených mezích, tedy do  $5^{\circ}\text{C}$ . Je třeba brát v potaz nepřesnost odhadu zátěže, avšak i přesto si troufáme konstatovat, že se podařilo vytvořit dostatečně vhodný regulátor. Dodejme, že aktuální řídicí systém (vyvinutý v projektu TAČR) sepne 1.kotel v daném období 44 krát, zatímco v naší simulaci sepne 48 krát. Druhý kotel sepne shodně 8 krát v obou případech.



**Obrázek 6.8:** a) Simulace řízení kaskády kotlů na požadovanou teplotu přívodní vody do systému (při konstantní poruše na vstupu). b) Výkony jednotlivých kotlů soustavy v průběhu simulace.



**Obrázek 6.9:** a) Simulace řízení kaskády kotlů na požadovanou teplotu přívodní vody do systému (s odhadnutou zátěží). b) Vývoj zátěže ve simulovaném období.

# Kapitola 7

## Závěr

Tato práce se zabývala návrhem řízení kaskády kotlů. Návrh byl vytvářen pro reálnou kotelnu, avšak testován pouze na modelu, který byl k tomu účelu vytvořen. Samotnému návrhu předcházelo seznámení se s tematikou HVAC systémů a řízení otopných soustav.

Bylo vysvětleno, co jsou HVAC systémy a byly popsány základní principy využívané k jejich řízení. Z oblasti regulace vytápění byly v práci uvedeny různé přístupy pro regulaci tepelného výkonu otopné soustavy a popsány způsoby řízení vytápění podle nejčastěji využívaných řídicích veličin (např. vnitřní a venkovní teplota vzduchu, zátěž atd.) a s nimi související pojmy (spínací poměr).

Hlavním tématem teoretické části práce bylo řízení zdrojů tepla a požadavky na něj. Byli jsme seznámeni s využívanými principy a způsoby řízení kotlů s jednostupňovými, vícestupňovými a modulačními hořáky. Byly představeny možnosti pro hydraulické zapojení kotlů do kaskády a způsoby jejich řízení s různými kritérii spínání jednotlivých kotlů (např. řízení podle teploty vratné vody, řízení podle přívodní vody do spotřebitelských okruhů).

V závěru teoretické části jsme popsali některé z metod identifikace systémů (přechodová analýza, metoda nejmenších čtverců) a kritéria hodnocení kvality modelu (FIT index, MRE). Tyto jsme následně využili v praktické části.

Praktická část byla z části věnována identifikaci systému z reálných dat získaných ze zkoumané kotelny domova pro seniory Hortenzie. Naměřená data jsme získali v průběhu přechodu ze starého řídicího systému na nový (vyvinutý v projektu TAČR). Pracovali jsme tedy se dvěma sadami dat. Měření byla prováděna při normálním provozu kotelny.

První data byla naměřená při provozu starého řídicího systému. Z těchto dat jsme identifikovali parametry zvoleného modelu, ve tvaru statického systému 1. řádu s dopravním zpožděním, přechodovou analýzou. Získali jsme tak základní představu o zkoumaném

systému. Přestože tato data byla získána z relativně krátkého časového úseku, při porovnání modelu s reálnými hodnotami byly objeveny značné odchylky způsobené různou zátěží otopné soustavy v průběhu měření.

Druhá sada dat byla získána měřením z průběhu tři dnů. Zde již bylo možné odečíst trendy v zátěži. Systém jsme identifikovali metodou nejmenších čtverců z vybraného časového úseku prvního dne, u kterého jsme předpokládali malou změnu zátěže. Výsledný model vyhovoval i pro totéž období druhého dne (čas od 11:30 do 18:00). Hodnota kritéria kvality modelu byla v obou případech přibližně  $FIT = 70\%$ . Pro naměřená data v rozsahu 24 hodin byl model (především vlivem velkých změn zátěže) nevyhovující ( $FIT = 13\%$ ). Pro zlepšení modelu byla vytvořena heuristika pro odhad zátěže (založená na spínacím poměru). Začleněním vlivu odhadnuté zátěže, jsme dosáhli uspokojivého výsledku ( $FIT = 57\%$ ).

Poslední částí této práce byl návrh a ověření řídicího systému pro regulaci teploty přívodní vody. Hlavním požadavkem na řízení bylo prodloužení doby chody kotlů (nízký počet sepnutí). Kriteřiem pro řízení spínání kotlů byla zvolena teplota přívodní vody do spotřebitelských okruhů. Využitím PI regulátoru v kombinaci s navrženým sekvenčním automatem pro spínání jednotlivých kotlů (místo klasicky užívaného krokového regulátoru) a časovým omezovačem vypínání kotlů, byl vytvořen řídicí algoritmus. Pro vhodné nastavení PI regulátoru byl využit nástroj [www.PIDlab.com](http://www.PIDlab.com). Řídicí algoritmus byl vytvořen pomocí v práci popsaných bloků řídicího systému REX.

V závěru práce byl navržený algoritmus ověřen na třech simulacích (v simulačním prostředí Matlab/Simulink): bez další zátěže, s konstantní přidanou zátěží a s vlivem dříve odhadnuté zátěže. Z první simulace je patrný pozitivní vliv časového omezovače vypínání kotlů. Z druhé pak pozitivní vliv užití navrženého automatu spínání kotlů.

Porovnáme-li výsledky simulace s proměnnou zátěží s naměřenými hodnotami, můžeme být s výsledkem spokojeni. Ve 24 hodinové simulaci systém sepnul 48 krát vedoucí kotel a 8 krát druhý kotel, s regulační odchylkou do  $5^{\circ}\text{C}$ . Tím se téměř vyrovnal aktuálnímu (novému) řídicímu systému kotelny. Ten v témže období sepnul druhý kotel shodně 8 krát, vedoucí pouze 44 krát se shodnou regulační odchylkou.

# Literatura

- [1] BAŠTA, J., *Regulace vytápění*, Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002.
- [2] HAINES, R., W., HITTLE, D., C., *Controls systems for heating, ventilating, and air conditioning*, New York: Springer Science+Business Media, 2006.
- [3] SIEMENS SWITZERLAND LTD; *Control of heating plants*, 2004.
- [4] REX CONTROLS, *Funkční bloky systému REX, Referenční příručka*, Plzeň, 2013.
- [5] MINISTERSTVO PRŮMYSLU A OBCHODU *Aktualizace státní energetické koncepce české republiky*, Praha, 2010.
- [6] MCDOWALL, R., *Fundamentals of HVAC systems*, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. and Elsevier Inc, Elsevier, 2006.
- [7] THE CARBON TRUST, *Heating, ventilation and air conditioning*, UK: The Carbon Trust, 2011.
- [8] BAŠTA, J., *Hydraulika a řízení otopných soustav*, Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003.
- [9] BAŠTA, J., *Řízení kotlů v kaskádě*, Vytápění, větrání, instalace 2/2011 Praha: Společnost pro techniku prostředí, 2011. s. 50-55.
- [10] ŠIMANDL, M., *Identifikace systémů a filtrace*, Plzeň: ZČU, 1995.
- [11] TŮMA, F., *Teorie řízení*, Plzeň: Západočeská univerzita, 2009.
- [12] MELICHAR, J., *Lineární systémy 1, Učební text*, Plzeň: Západočeská univerzita, 2011.

- [13] MELICHAR, J., *Lineární systémy 2, Učební text*, Plzeň: Západočeská univerzita, 2011.
- [14] EYNARD, J., GRIEU, S., POLIT, M., *Modular approach for modeling a multi-energy district boiler*, Applied Mathematical Modelling 35: Elsevier Inc, 2011. s. 3926-3957
- [15] PERCANNELLA, G., VENTO, M., *A Self-trainable System for Moving People Counting by Scene Partitioning*, Image Analysis and Recognition, Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2011. s.297-306
- [16] LJUNG, L., *System Identification Toolbox<sup>TM</sup> User's Guide* : The MathWorks, Inc., 2014.
- [17] JØRGENSEN, M., *A Critique of How We Measure and Interpret the Accuracy of Software Development Effort Estimation*, 1st International Workshop on Software Productivity Analysis and Cost Estimation: Information Processing Society of Japan, 2007. s. 15-22. ISBN 978-4-915256-72-1 C3040.
- [18] TICHÝ, M., *Regulace teploty v budovách, Bakalářská práce*, Plzeň: Západočeská univerzita, 2012.
- [19] ČECH, M., SCHLEGEL, M., *Návrh PID regulátoru přes internet: www.PIDlab.com*, AUTOMA 2/2004 Praha: FCC PUBLIC,s.r.o., 2004. s. 53-56.



# Příloha A

## Obsah přiloženého CD

K této práci je přiloženo CD, které obsahuje:

- Soubor Simulace.mdl simulačního modelu řídicího systému
- Soubory .mat s naměřenými daty
- Soubory .m obsahující skripty identifikace systémů a simulací
- Elektronickou verzi diplomové práce