

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA MĚŘENÍ



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Metody řízení kaskád kotlů

Autor: Martin Bílek

Vedoucí práce: Ing. Jan Šulc

Praha, 2017

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Bílek** Jméno: **Martin** Osobní číslo: **420154**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra měření**
Studijní program: **Kybernetika a robotika**
Studijní obor: **Senzory a přístrojová technika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Metody řízení kaskád kotlů

Název bakalářské práce anglicky:

Control Methods for Cascades of Boilers

Pokyny pro vypracování:

- Formou rešerše zhodnoťte dosavadní principy regulace tepelných zdrojů (kotlů). Porovnejte klasické a moderní přístupy řízení kotlů a kaskád kotlů.
- Na vybraném tepelném zdroji z praxe posuďte kvalitu způsobu regulace.
- Navrhněte a implementujte nový způsob regulace tepelného zdroje s využitím PID regulace v kombinaci s automatickým sekvenčním řízením pro optimalizaci spínání jednotlivých kotlů kaskády a porovnejte kvalitu regulace před a po implementaci nového způsobu řízení.
- Navrhněte obecnou metodu regulace kaskád kotlů pomocí Function Block Diagram (IEC 61131-3). Cílem je posoudit a navrhnout vhodné zobecněné programové bloky pro implementaci moderní regulace kaskád kotlů v PLC.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Bašta, J a Hemzal, K.: Regulace v technice prostředí staveb. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2014. ISBN 978-80-01-05455-0.
- [2] Bašta, J.: Řízení kotlů v kaskádě. Vytápění, větrání, instalace. 2011, 20(2), 50-55. ISSN 1210-1389.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Jan Šulc, UCCEB Buštěhrad

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **14.02.2017** Termín odevzdání bakalářské práce: **26.05.2017**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2018**

Podpis vedoucí(ho) práce

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Název práce: Metody řízení kaskád kotlů

Autor: Martin Bílek

Katedra (ústav): Katedra měření

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jan Šulc

e-mail vedoucího: sulcjan5@fel.cvut.cz

Abstrakt Cílem bakalářské práce je zefektivnit existující řídicí algoritmy pro regulaci kaskády tepelných zdrojů a na jejich základě navrhnout obecné řešení. Pro celkové zhodnocení kvality aktuálního řídicího algoritmu byla provedena analýza dlouhodobě sbíraných dat za účelem odhalení nedostatků implementovaného programu. Na základně získaných výsledků, je v této práci navrženo kompletně nové řešení, které odstraňuje nedostatky předešlého způsobu regulace. Implementace nového algoritmu je následována reálnou aplikací dané regulace a analýzou získaných dat za účelem porovnání původní a nové regulace. V závěru práce je popsán postup vytvoření obecných metod pro řízení kaskád kotlů pomocí function block diagram dle normy *IEC 61131-3*.

Klíčová slova: Návrh řídicích algoritmů, FBD, analýza dat, regulace

Title: Control Methods for Cascade of Boilers

Author: Martin Bilek

Department: Department of Measurement

Supervisor: Ing. Jan Šulc

Supervisor's e-mail address: sulcjan5@fel.cvut.cz

Abstract The main aim of this work is to improve the existing control algorithms for regulation of the cascade of heat sources and to propose a general solution on their basis. For the overall evaluation of the quality of the current control algorithm, an analysis of long-term data was made in order to detect deficiencies of the implemented program. On the basis of the obtained results, a completely new solution is proposed to remove the shortcomings of the previous control. The implementation of the new algorithm is followed by the real application of the given control and the analysis of the obtained data in order to compare the original and the new control system. At the end of this work, the procedure for creation of general methods is described. Such general methods are proposed for control of boiler cascades using function block diagram according to *IEC 61131-3*.

Keywords: development of control the algorithm, FBD, data analysis, regulation

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval svému vedoucímu práce Ing. Janu Šulcovi za vedení, rady a podporu při zpracování práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Michalu Hroudovi za konzultace. Také bych rád poděkoval firmě Energocentrum PLUS, s. r. o., za poskytnutí materiálů pro zhotovení práce, konkrétně Jiřímu Zikmundovi a Ing. Petru Kuderovi za podporu a trpělivost. V neposlední řadě bych rád poděkoval své rodině za podporu.

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 25. května 2017

Martin Bílek

OBSAH

1. Úvod	1
2. Tepelné zdroje	2
2.1. Tepelný zdroj a jeho charakteristiky	2
2.2. Principy regulace tepelného zdroje	3
2.3. Používané způsoby řízení zdrojů tepla	4
2.3.1. Regulace podle teploty vody ze zdroje tepla	4
2.3.2. Regulace podle vnitřní teploty	5
2.3.3. Regulace podle venkovní teploty - ekvitermní křivka	5
2.3.4. Ekvitermní regulace se zpětnou vazbou na vnitřní teplotu	6
2.3.5. Regulace na otevřený ventil	7
2.3.6. Prediktivní řízení	8
3. Analýza řízení kotelny	10
3.1. Stávající stav regulace kotelny	10
3.1.1. Regulace kotlů	10
3.1.2. Regulace topné soustavy	11
3.2. Analýza	11
3.2.1. Analýza kvality regulace	11
3.2.2. Analýza doby běhů kotlů	12
3.2.3. Analýza četnosti spínání jednotlivých kotlů	13
4. Implementace nového řízení	16
4.1. Návrh	16
5. Návrh obecné metody řízení	20
5.1. Návrh algoritmů pro řízení kaskády kotlů	20
5.1.1. Blok kaskádního řízení	21
5.1.2. Blok řízení kotle s dvoustupňovým hořákem	24
5.1.3. Blok řízení kotle s dvoustupňovým hořákem s hlídáním zpátečky	26
5.1.4. Blok řízení kotle s modulovaným hořákem	27
5.2. Příklady použití navržených bloků	28
5.2.1. Příklad kaskády s dvoustupňovým hořákem	28

5.2.2. Příklad kaskády s dvěma kotli s dvoustupňovými hořáky a hlídanou zpátečkou .	29
5.2.3. Příklad kaskády s modulovaným hořákem	30
6. Závěr	31
Přílohy	I
A. Programová část původní implementace v SoftPLC IDE	II
B. Programová část nové implementace v Merbon IDE	VII
C. Obsah CD-ROM	X

SEZNAM OBRÁZKŮ

2.1.	Pohled na mětský zdroj tepla, převzato z [11].	2
2.2.	Pohled na kotelnu s třemi plynovými kotli v kaskádním zapojení, převzato z [12]	3
2.3.	Schéma regulace přívodní teploty vody ze zdroje tepla, převzato z [4].	4
2.4.	Schéma regulace podle vnitřní teploty prostoru, převzato z [10].	5
2.5.	Graf jednotlivých ekvitermních křivek v různých místnostech.	5
2.6.	Schéma ekvitermní regulace se zpětnou vazbou na vnitřní teplotu.	6
2.7.	Schéma regulace na „Otevřený“ ventil, převzato z [5].	7
2.8.	Schéma struktury prediktivního řízení tepelného zdroje.	8
3.1.	Schéma stávající regulace analyzované kotelny.	11
3.2.	Graf naměřených hodnot z období 1. 12. 2016 až 31. 1. 2017	12
3.3.	Graf regulační odchylky ve zkoumané oblasti 1. 12. 2016 až 31. 1. 2017.	12
3.4.	Grafy doby běhu kotlů za celé zkoumané období od 10. 9. 2016 do 14. 4. 2017.	13
3.5.	Graf četnosti spínání jednotlivých kotlů v období 10. 9. 2016 až 14. 4. 2017. . .	14
3.6.	Výstup z dispečerského rozhraní pro řízení a analýzu průběhu kotlů původní implementace.	15
4.1.	Schéma nové regulace kaskády kotlů K1 a K2.	17
4.2.	Graf průběhů naměřených hodnot z původní implementace řízení.	18
4.3.	Graf průběhu z naměřených hodnot nové implementace řízení	18
5.1.	Funkční blok kaskádní řízení z vývojového prostředí Merbon IDE	23
5.2.	Funkční blok řízení kotle s dvoustupňovým hořákem z vývojového prostředí Merbon IDE	25
5.3.	Funkční blok řízení kotle s dvoustupňovým hořákem s hlídáním vratné vody z vývojového prostředí Merbon IDE	26
5.4.	Funkční blok řízení kotle s modulovaným hořákem z vývojového prostředí Merbon IDE	27

5.5. Schéma zapojení kaskády kotlů s dvoustupňovými hořáky ve vývojovém prostředí Merbon IDE	28
5.6. Schéma zapojení kaskády kotlů s dvoustupňovými hořáky a hlídanou zpátečkou ve vývojovém prostředí Merbon IDE	29
5.7. Schéma zapojení kaskády se dvěma kotli s modulovaným hořákem ve vývojovém prostředí Merbon IDE	30
A.1. Schéma řízení kaskády kotlů 1. část	III
A.2. Schéma řízení kaskády kotlů 2.část	IV
A.3. Schéma řízení jednotlivých kotlů	V
A.4. Schéma pro řízení požadované teploty	VI
B.1. Schéma řízení kaskády kotlů a jednotlivých kotlů	VIII
B.2. Schéma výběru požadované teploty pro ohřev	IX

SEZNAM TABULEK

4.1. Porovnání provozních dat obou kotlů K1 a K2 při původním a novém řízení. . .	19
---	----

ÚVOD

Hlavním tématem této práce je návrh řízení pro kaskády kotlů. Řízení kotlů je aplikováno z důvodu ekonomické úspory, snížení opotřebení použitého technického zařízení, menšího negativního dopadu na životní prostředí a vyšší účinnosti požadovaného vytápění.

V první části bude teoreticky popsán tepelný zdroj a metody jeho regulace. Součástí této kapitoly bude i popis principů regulace tepelného zdroje a používaných způsobů řízení pro jednotlivé zdroje tepla, jako je regulace podle teploty přívodní vody ze zdroje tepla a další typy regulace.

Analýzou zadané kotelny z praxe se budeme zabývat ve druhé části. Naměřená data byla poskytnuta firmou Energocentrum PLUS, s. r. o. Zkoumané období z topné sezóny bude využito pro analýzu kvality regulace tepelného zdroje pro vytápění daného objektu.

Ve třetí části bude představen návrh nové implementace regulace na základě předešlé analýzy. Pokusíme se v ní navrhnout zlepšení stávající regulace tepelného zdroje. Následně bude porovnána původní implementace řízení s novou implementací řízení kaskády kotlů.

Čtvrtá část bude věnována návrhu obecné metody využití regulace kaskády kotlů. Návrh bude implementován ve funkčních blocích pro řízení v programovatelných automatech (PLC).

TEPELNÉ ZDROJE

2.1. Tepelný zdroj a jeho charakteristiky

Tepelný zdroj můžeme popsat jako zařízení, ve kterém získáváme teplo pro tepelnou soustavu, jež podle velikosti můžeme rozdělit do následujících kategorií: meziměstský, městský, bytový, objektový.



Obrázek 2.1.: Pohled na městský zdroj tepla, převzato z [11].

Teplo je obvykle produkováno chemickými procesy jako je spalování paliv nebo využívání prvotního (přírodního) tepla, popřípadě využívání druhotného tepla (chlazení zdrojů energie). Podle požadavku na množství dodaného tepla dělíme zdroje tepla na teplárny (viz. obrázek 2.1), nebo kotelny (viz. obrázek 2.2) [6].



Obrázek 2.2.: Pohled na kotelnu s třemi plynovými kotli v kaskádním zapojení, převzato z [12]

V případě, že dochází k chemickému procesu hoření mluvíme o zdroji tepla. Zdrojem tepla je například kotel, který můžeme charakterizovat pomocí následujících parametrů: [6]

- teplonosné látky (nizkoteplotní, teplovodní, horkovodní)
- tepelné, tlakové poměry (nizkotlaké, středotlaké, vysokotlaké)
- konstrukce (článekové, válcové aj.)
- využití palivo (plyn, dřevo, uhlí, elektrická energie aj.)
- použití (stacionární, závěsné, kondezační)

2.2. Principy regulace tepelného zdroje

Při regulaci tepelného zdroje jde převážně o řízení výkonu kotle se záměrem udržení minimální odchylky teploty vody vystupující ze zdroje tepla od požadované hodnoty. Pojem regulace a ovládání lze definovat jako technické pochody přístrojů, funkčních systémů, či zařízení u kterých ovlivňujeme buď fyzikální veličiny (teplotu, tlak, rychlost) nebo technické veličiny například výkon či krouticí moment. Například teplo produkované plynovými kotly je regulováno pomocí množství dodaného paliva (plynu). Cílem řízení je zajištění dodávky potřebného množství tepla do topného systému při zajištění minimálních cen nákladů na vstupní energie [3].

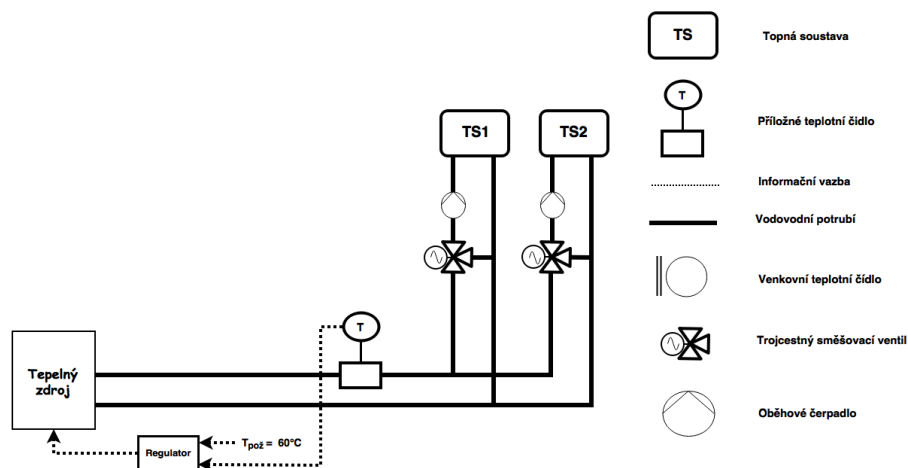
2.3. Používané způsoby řízení zdrojů tepla

V současné době se používá několik typů řízení topných soustav. Je třeba si uvědomit, že z povahy regulace plynou rozdílné nároky na instalaci nastavení i provoz, kdy výsledná volba regulace je závislá na parametrech vytápěného objektu. Regulace topného systému budovy by měla být již součástí samotného návrhu. V případě, kdy je topný systém navržen bez zohlednění regulace, hrozí, že systém může být v některých případech neřiditelný. Zvolená strategie řízení určuje energetickou efektivitu celé topné soustavy i z toho plynoucí náklady na její provoz. Používané způsoby regulace jsou: [3]

- regulace podle teploty výstupní vody ze zdroje tepla
- regulace podle vnitřní teploty
- regulace podle venkovní teploty – ekvitermní regulace
- ekvitermní regulace se zpětnou vazbou na vnitřní teplotu
- prediktivní řízení

2.3.1. Regulace podle teploty vody ze zdroje tepla

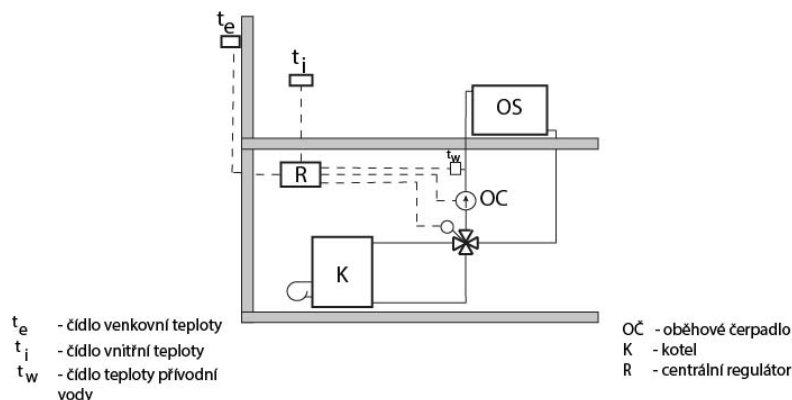
Nejjednodušší a nejvyužívanější formou regulace tepelného zdroje je regulace podle přívodní teploty vody, neboť regulovanou veličinu měříme pomocí čidla teploty, které je nainstalováno na přívodní trubce do soustavy a žádaná teplota je nastavená dle požadavků soustavy. Schéma regulace lze vidět na obrázku 2.3 [4].



Obrázek 2.3.: Schéma regulace přívodní teploty vody ze zdroje tepla, převzato z [4].

2.3.2. Regulace podle vnitřní teploty

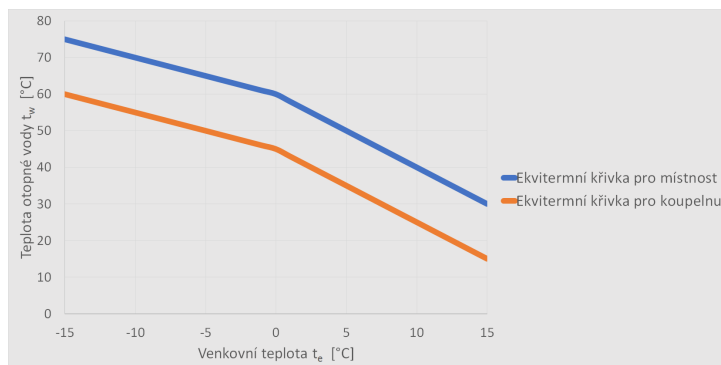
Hlavním použitím je možnost samostatného řízení teploty vody pro jednotlivé zóny (místnosti). Principem regulace je rozdělení většího objektu do menších a snáze říditelných oblastí (obrázek 2.4). Lze si představit, že každá zóna má vlastní regulační smyčku, ve kterém je často použita teplota místnosti. Výhoda této regulace je, že můžeme nastavit různé teploty v jednotlivých místnostech (zónách). V momentě, kdy máme jeden tepelný zdroj pro všechny zóny, musíme zaručit dostatek energie pro zónu s největším požadavkem [4].



Obrázek 2.4.: Schéma regulace podle vnitřní teploty prostoru, převzato z [10].

2.3.3. Regulace podle venkovní teploty - ekvitermní křivka

Ekvitermní regulace je způsob regulace, kde potřeba tepla ve vytápěném objektu závisí na venkovní teplotě. Venkovní teplotu měříme pomocí teplotního čidla, které je umístěno na vnější plášti objektu a předává informaci regulátoru. Regulátor funguje na základě zadané charakteristiky (Ekvitermní křivka). Ukázka grafu ekvitermní křivky je na obrázku 2.5. Tvar ekvitermní křivky závisí na vlastnostech budovy. Správné nastavení ekvitermní křivky většinou představuje dlouhodobý a pracný proces [2].



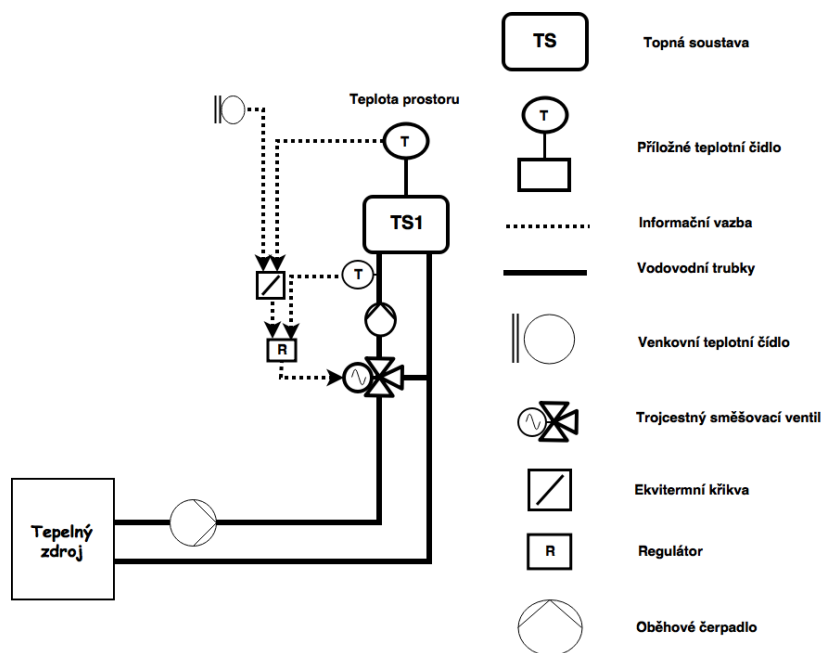
Obrázek 2.5.: Graf jednotlivých ekvitermních křivek v různých místnostech.

Každá ekvitermní křivka odpovídá jedné konkrétní teplotě v místnosti. Regulátor reguluje pouze teplotu topné vody v závislosti na venkovní teplotě vzduchu. Teplota vratné vody se mění v závislosti na podmínkách, za kterých pracuje celá soustava. Regulace přívodní teploty je rychlá, s malým dopravním zpožděním. [2]

2.3.4. Ekvitermní regulace se zpětnou vazbou na vnitřní teplotu

Za jednu z mnoha modifikací ekvitermní regulace můžeme považovat regulaci se zpětnou vazbou na vnitřní teplotu objektu. Nejedná se čistě o ekvitermní regulaci, ale o ekvitermní řízení se zpětnou vazbou na vnitřní teplotu. Regulátor snímá vnitřní teplotu v určeném prostoru (místnost) a koriguje výše popsany systém ekvitermní regulace viz. obrázek 2.6. Vliv teploty můžeme rozdělit do dvou kategorií: [1]

- dlouhodobý – regulace na základě zpětné vazby z prostoru dokáže přizpůsobit (adaptovat) odhadem zadanou otopnou křivku vlastnostem vytápěného objektu (změna strmosti otopné křivky a paralelní posun). Tudiž se zde jedná o adaptivní regulaci [1]
- krátkodobý – na základě zjištěné teplotní odchylky v prostoru regulátor účelově koriguje žádanou prostorovou teplotu [1]



Obrázek 2.6.: Schéma ekvitermní regulace se zpětnou vazbou na vnitřní teplotu.

Ekvitermní regulace zabezpečuje rovnováhu mezi výrobou a spotřebou tepla. Tato rovnováha je závislá na určitém předpokladu, který se nazývá vyladěná otopná křivka. To je jeden z důvodů vyšších úspor. Další důvod je ten, že se vyrobí teplo pouze o potřebné kvalitě (teplota otopné

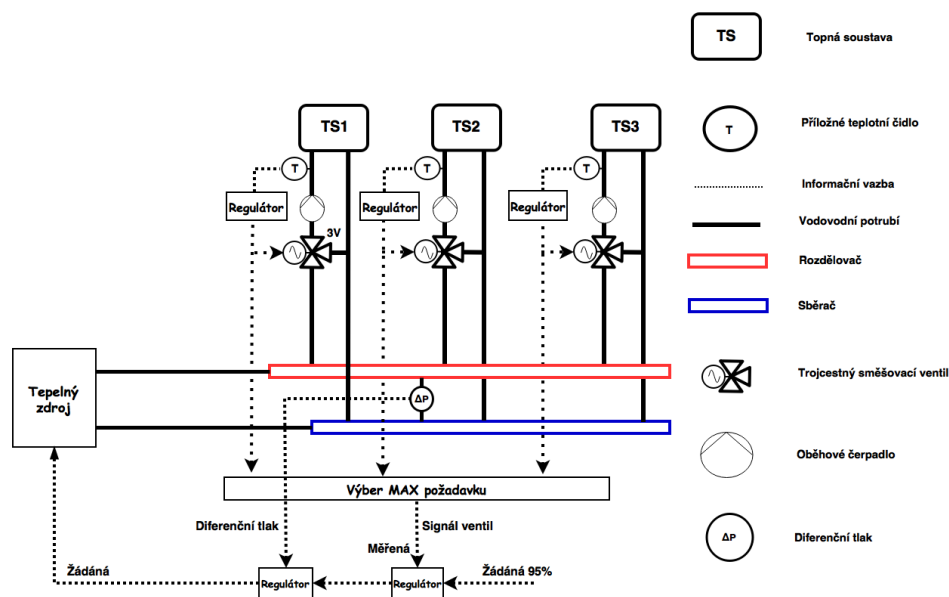
vody). Požadavky na teplotu otopné vody vždy směřují od spotřeby tepla (otopná křivka a vliv teploty v prostoru) ke zdroji tepla (kotel). Je to z toho důvodu, abychom mohli nezávisle řídit více otopných okruhů, které mají různý odběr tepla v čase a potažmo jiné požadavky [1].

2.3.5. Regulace na otevřený ventil

Obrázek 2.7 znázorňuje regulaci tepelného zdroje na „Otevřený“ ventil. Regulace tepelného zdroje (otáčky frekvenčního měniče, výkon kotle atd.) a regulačně směšovací ventilů v topné soustavě realizujeme pomocí akční veličiny z regulátoru topné soustavy [5].

Regulaci tepelného zdroje regulujeme podle požadavku z regulačních směšovacích ventilů na tzv. polohu „Otevřeno“ (95%¹). Pokud se v soustavě nachází více regulačních směšovacích ventilů, tak výběr největšího požadavku zavedeme softwarově do modulu pro výběr maxima. Z výstupního signálu regulujeme tepelný zdroj. Pro zlepšení regulace uvažujeme měření diferenčního tlaku na rozvodné větvi [5].

Změnou diferenčního tlaku regulujeme tepelný zdroj. Z důvodů měřeného diferenčního tlaku musíme nastavit regulační ventil na „Otevřený ventil“ tzv. vlečnou regulaci. Díky této regulaci můžeme dosáhnout zlepšení regulace soustavy [5].

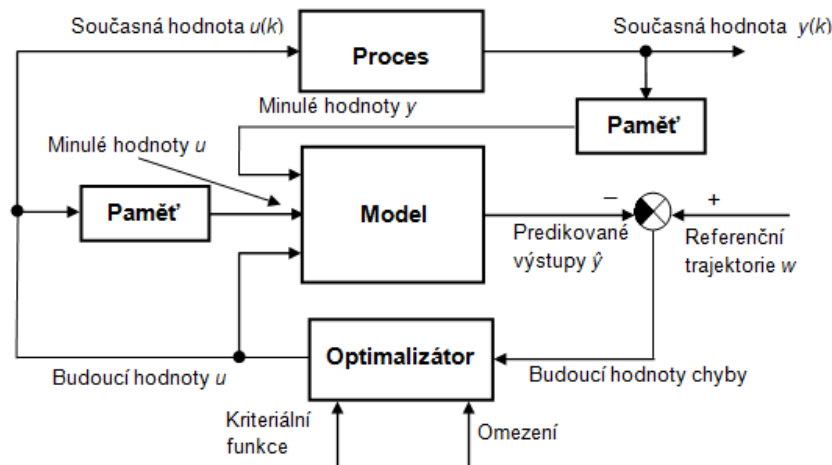


Obrázek 2.7.: Schéma regulace na „Otevřený“ ventil, převzato z [5].

¹ Je-li regulační ventil otevřen na 95 %, jsou otáčky oběžného kola čerpadla a tím i diferenční tlak čerpadla tak velký, jak tento ventil právě potřebuje. Pokud by byl ventil otevřen např. na 50 %, má čerpadlo zbytečně veliký diferenční tlak a ventil ho maří škrcením. Pokud by byl ventil otevřen na 100 %, není možné zjistit z tohoto signálu, zda není diferenční tlak malý

2.3.6. Prediktivní řízení

Jádrem algoritmu prediktivního řízení je řešení optimalizační úlohy s daným kritériem optimality a modelem procesu (viz. obrázek 2.8). Kritéria optimality jsou volena podle konkrétního řešení úlohy. V průmyslu to typicky bývá požadavek na maximalizaci objemu výroby a zisku, minimalizaci vstupních nákladů, minimalizaci množství vedlejších produktů apod. V případě vytápění budovy je to dodržení požadovaných vnitřních teplot a minimalizace energie potřebné k vytápění [3].



Obrázek 2.8.: Schéma struktury prediktivního řízení tepelného zdroje.

Strategie prediktivního řízení nehledá pouze akční zásah pro následující periodu vzorkování jako u jiných metod, ale hledá se celá optimální posloupnost zásahů pro daný horizont predikce, a to na základě modelu procesu. Nalezená optimální posloupnost akčních zásahů by mohla být postupně použita v časovém intervalu daném horizontem predikce. Po zavedení všech vypočítaných akčních zásahů pro celý daný časový interval by se našla nová posloupnost. Takový přístup však není praktický. Představuje řízení v otevřené smyčce, kdy nemohou být brány v úvahu, a tedy ani eliminovány poruchové veličiny působící na systém v jednotlivých periodách vzorkování. Tento nedostatek je odstraněn zavedením zpětné vazby prostřednictvím klouzavého horizontu. Při použití klouzavého horizontu se z celé vypočítané optimální posloupnosti použije pouze první akční zásah a v následující periodě vzorkování se na základě nového měření vypočítá nová posloupnost [3].

Ovlivňující pro chování budovy jsou přírodní podmínky. Vývoj vnitřní teploty v budově se bude počítat na základě povětrnostních vlivů, které jsou vystavěny na budovu v horizontu predikce. Ovlivňujícím faktorem jsou následující: [3]

- venkovní teplota
- intenzita slunečního záření
- rychlost větru

Důležitou součástí prediktivního řízení je tedy předpověď počasí [3].

ANALÝZA ŘÍZENÍ KOTELNY

V této části se zabýváme použitím analytického algoritmu vytvořeného ve spolupráci s firmou Energocentrum PLUS, s. r. o., jejímž produktem je mimo jiné vývoj algoritmů pro řízení kaskád kotlů. Algoritmus byl využit pro analýzu dat z kotelny, jejíž jméno provozovatel nedovolil zveřejnit.

Výsledkem analytické části bude zhodnocení aktuálního stavu řízení v daném objektu a následný návrh úprav řídicích algoritmů za účelem zefektivnění regulace. Kotelna je vybavena dvěma kotli s dvoustupňovými hořáky sloužícími pro ohřev vody. Odtud je následně ohřátá voda skrze čerpadlo hnána na rozdělovač, který dále rozděluje hnanou vodu do tří okruhů, z nichž dva slouží jako samostatně regulovatelné okruhy a okruh třetí slouží pro ohřev teplé vody (dále jen TV).

3.1. Stávající stav regulace kotelny

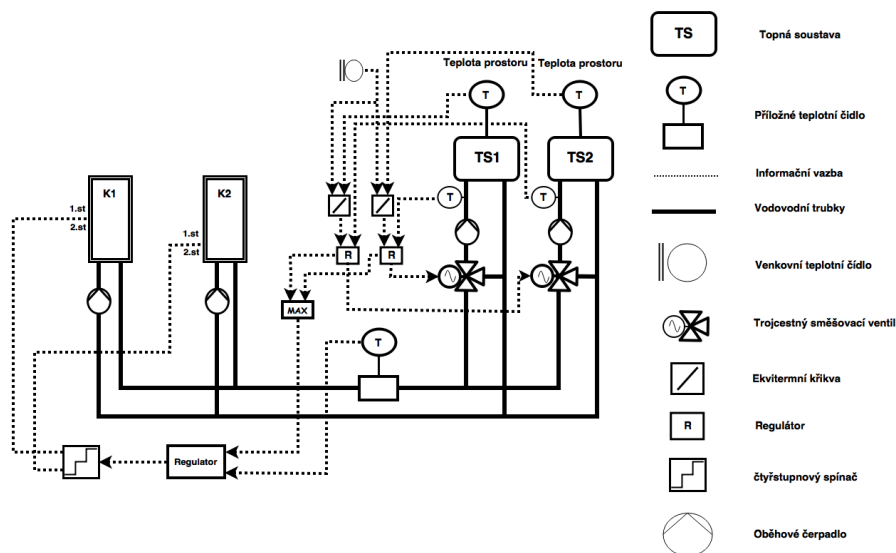
3.1.1. Regulace kotlů

Pro řízení kotle byl navržen regulátor (viz. obrázek 3.1), jehož regulovanou veličinou je teplota vystupující z kaskádního zapojení kotlů, kdy teplota ohřáté vody je měřena před vstupem do rozdělovače jehož funkce je vysvětlena výše. Množinou možných řídicích veličin jsou jednotlivé požadavky na aktuální teplotu v jednotlivých okruzích. Samotná řídicí veličina je pak vybrána jakožto maximum z této množiny.

Řízení stupňů kaskády kotlů zajišťuje čtyřstupňový spínač. Vstupním parametrem spínače je akční veličina z regulátoru nabývající hodnot, $k \in \langle 0, \dots, 4 \rangle$. Spínač na základě vstupní veličiny volí adekvátní stupeň k pokrytí aktuálního požadavku na teplotu ohřívání vody.

3.1.2. Regulace topné soustavy

Topná soustava byla navržena podle ekvitermní regulace se zpětnou vazbou na vnitřní prostor. Pro řízení této soustavy byl navržen regulátor, v němž řídicí veličinou je ekvitermní křivka, která je korigovaná teplotou z vnitřního prostoru. Regulovanou veličinou je vstupní teplota do topné soustavy. Akční veličina (povel) z regulátoru je přivedena na regulovaný směšovací ventil a též určuje, který prvek z množiny řídicích veličin bude vybrán (viz výše).



Obrázek 3.1.: Schéma stávající regulace analyzované kotelny.

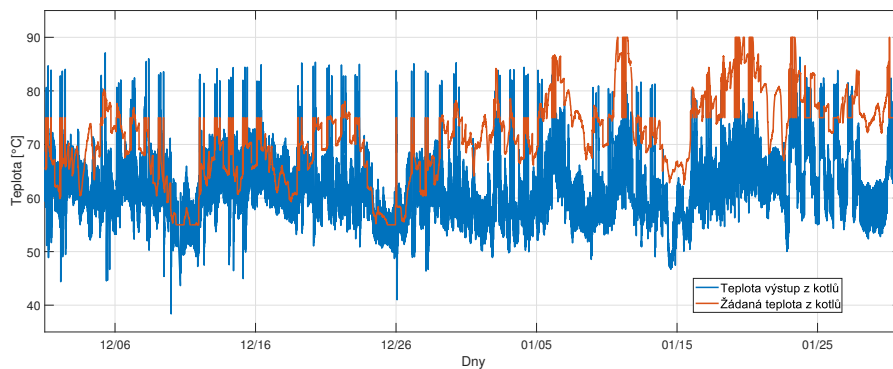
3.2. Analýza

3.2.1. Analýza kvality regulace

Pro analýzu byla použita poskytnutá data firmou Energo centrum PLUS, s. r. o., z období od 10. 9. 2016 do 14. 4. 2017. Použitá data byla stažena z databáze prostřednictvím firemního softwaru Mervis. Toto období bylo vybráno z důvodů vrcholné topné sezóny, což má za následek maximální využití kotelny a její regulace. Kritéria podrobně analyzována jsou:

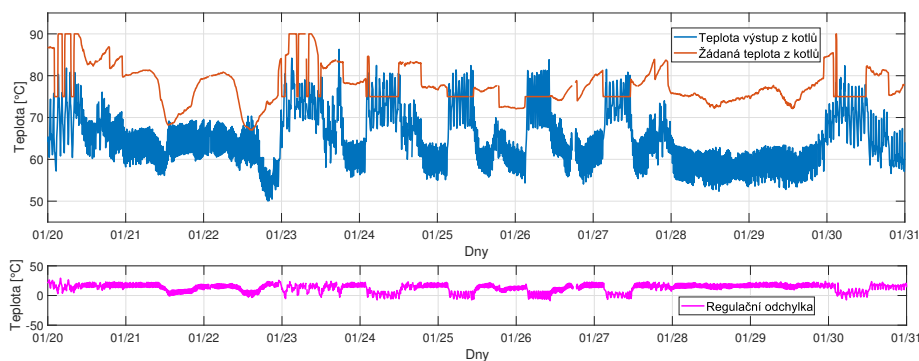
- schopnost udržet regulovanou veličinu v požadovaných mezích
- procentuální využití jednotlivých kotlů
- přepínání četnosti jednotlivých výkonových stupňů dílčích kotlů

Regulační část této práce se následně pokouší minimalizovat výše zmíněná kritéria za účelem zefektivnění využití dostupných zdrojů skrze implementaci nového řízení. V grafu 3.2 je zobrazena požadovaná teplota z řízených okruhů a reálná teplota vody vystupující z kaskády kotlů. Z topné sezóny jsou vybrána data, která odpovídají nejchladnějším měsícům v topné sezóně.



Obrázek 3.2.: Graf naměřených hodnot z období 1. 12. 2016 až 31. 1. 2017

V druhé polovině předchozího grafu můžeme pozorovat nárůst odchylky měřené teploty od požadované. Z tohoto důvodu se u grafu 3.3 zaměřujeme právě na tuto část. Jak je z grafu 3.3 patrné, kotle nejsou schopny pokrýt požadavky na teplotu. Důvodem může být například odstávka kotle či možná závada v řídicí jednotce. Součástí grafu 3.3 je i regulační odchylka zobrazující rozdíl požadované teploty a měřené teploty. Odchylka se pohybuje převážně v kladných hodnotách, což znamená, že daný systém nezvládá regulovat měřenou teplotu na žádanou teplotu.

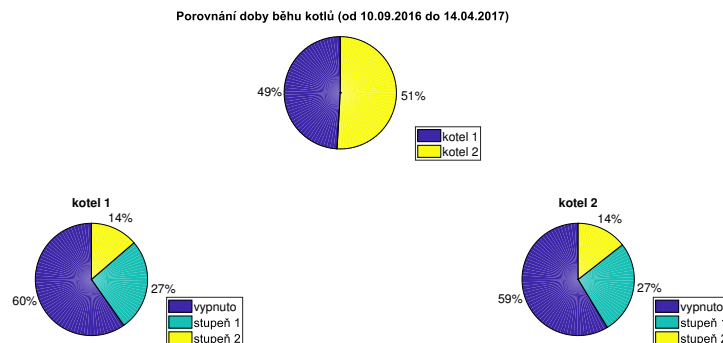


Obrázek 3.3.: Graf regulační odchylky ve zkoumané oblasti 1. 12. 2016 až 31. 1. 2017.

3.2.2. Analýza doby běhů kotlů

Graf na obrázku 3.4 se zabývá poměrem dob chodu jednotlivých kotlů a poskytuje tedy informaci o tom, jak dlouho jednotlivé kotle pracovaly v analyzovaném období. Rozdíl mezi využitím jednotlivých kotlů je pouze 2% za celé období, což lze považovat za vyvážené. Tedy algoritmus pro střídání jednotlivých kotlů funguje podle výše uvedených požadavků. Další dva grafy znázorňují využití jednotlivých stupňů příslušných kotlů.

U obou grafů je vidět, že kotle většinu času strávily ve stavu vypnuto (60% a 59%). Druhým nejčastějším stavem je první stupeň (27% a 27%) a nejméně času oba kotle pracovaly ve stavu druhý stupeň (14% a 14%).



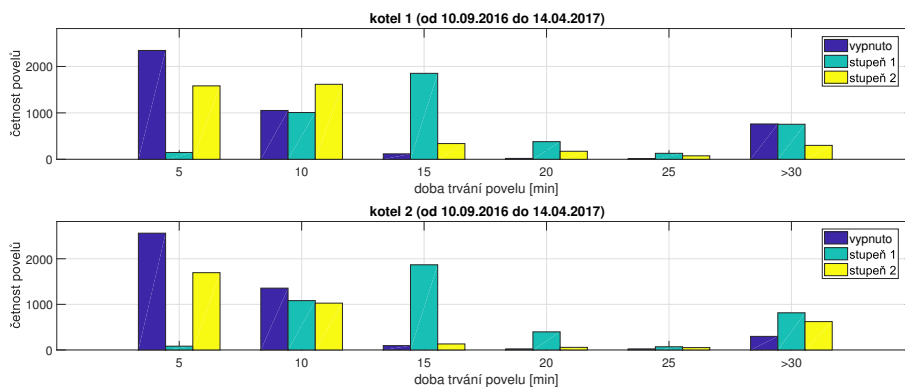
Obrázek 3.4.: Grafy doby běhu kotlů za celé zkoumané období od 10. 9. 2016 do 14. 4. 2017.

3.2.3. Analýza četnosti spínání jednotlivých kotlů

Četností spínání jednotlivých stupňů kotle. Graf 3.5 znázorňuje následující stavy:

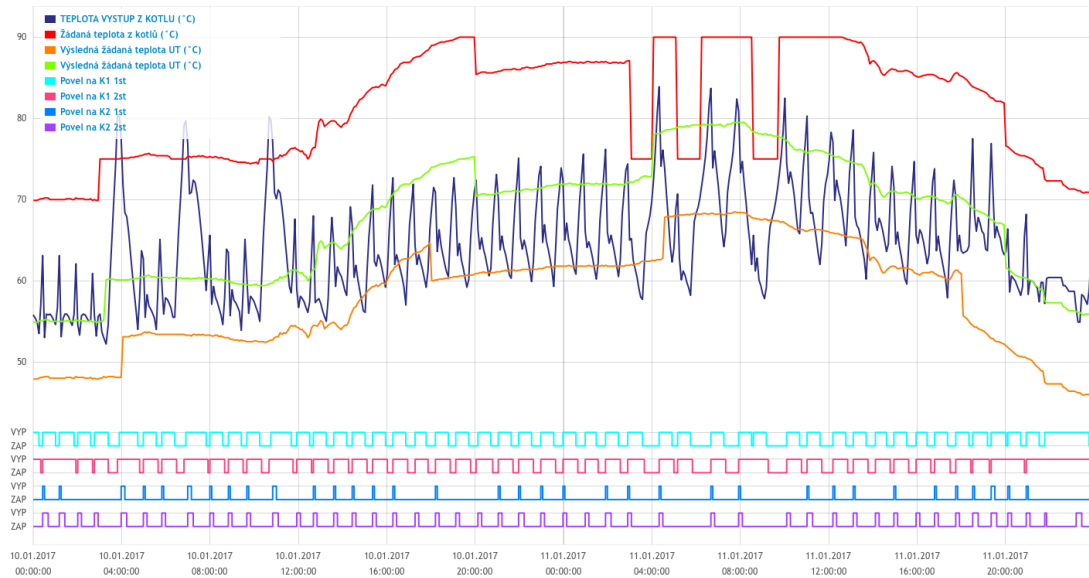
- vypnuto
- stupeň 1
- stupeň 2

Graf četnosti délky jednotlivých povelů pro dané intervaly (v minutách), kdy na ose x je doba trvání povelu v minutách rozdělena do pětiminutových intervalů. Pro kotel 1 při hodnotě trvání 5 minut vidíme extrémně vysokou četnost stavu vypnuto a první stupeň, což indikuje skutečnost, že v případě, kdy se měřená teplota pohybuje v požadovaném rozmezí, funguje regulace na bázi dvoustavového automatu (zapnuto, vypnuto). V reálné situaci bychom rádi předešli takovému průběhu, kdy zamýšleným řešením je prodloužení intervalu, kdy je kotel ve stavu 1. stupeň. Výsledkem by mělo být zredukování četností stavů vypnuto a 1. stupeň pro interval 5 minut. Analogická situace nastává i pro kotel 2, kdy řešení dané situace je shodné jako pro kotel 1.



Obrázek 3.5.: Graf četnosti spínání jednotlivých kotlů v období 10. 9. 2016 až 14. 4. 2017.

Na obrázku 3.6 zobrazujícího porovnání výstupní teploty z kaskády kotlů a požadované teploty je zřejmé, že regulace nefunguje správně. Dochází k častému přepínání mezi stavem vypnuto a 2. stupněm, čehož se chceme vyvarovat. Zamýšleným vylepšením průběhem regulace je postupné spínání a vypínání jednotlivých stupňů, nikoli skok mezi krajními hodnotami. Dalším problémem, jež graf zachycuje, je neschopnost kaskády kotlů regulovat teplotu na požadovanou hodnotu. Z grafu 3.6 je jasně patrné, že teplota je v aktuální chvíli regulována na hodnotu (vyznačena zeleně), která se od skutečné požadované hodnoty (vyznačené červeně) liší o 15 °C. V regulačním obvodu nebyla nalezena chyba způsobující tuto odchylku. Chyba byla nalezena v implementaci software pro řízení, kde byla brána jako požadovaná hodnota teplota o 15 °C nižší, než vypočtená požadovaná hodnota pro kaskádu.



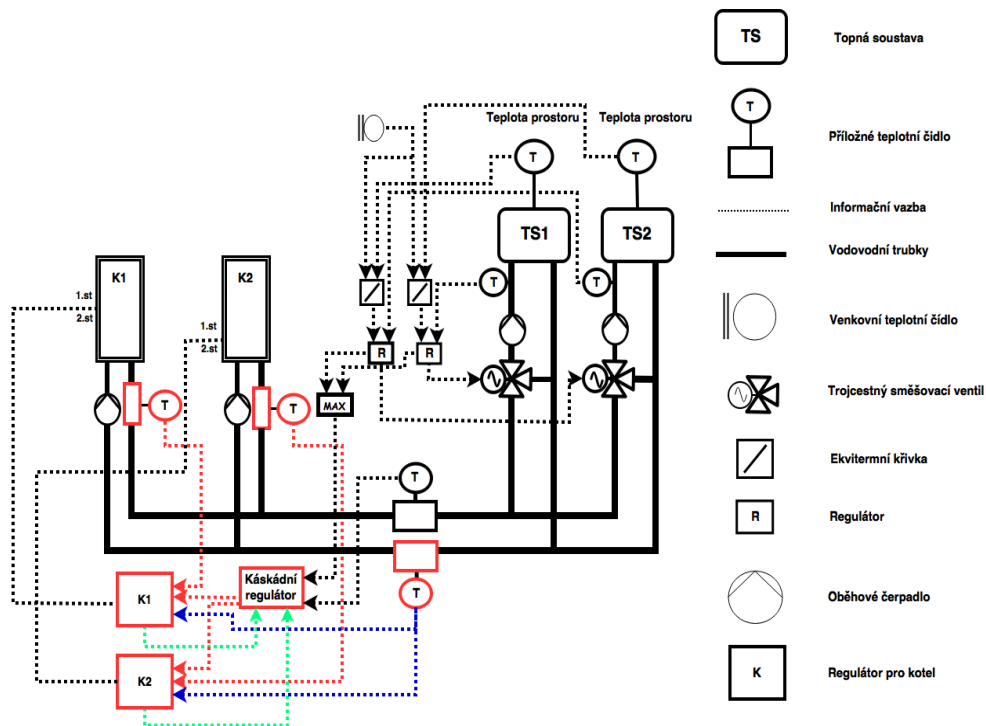
Obrázek 3.6.: Výstup z dispečerského rozhraní pro řízení a analýzu průběhu kotlů původní implementace.

IMPLEMENTACE NOVÉHO ŘÍZENÍ

4.1. Návrh

V následující části této práce se zabýváme implementací nové regulace pro zefektivnění využití kaskády kotlů. Hlavním cílem návrhu implementace nového řízení není vylepšení regulace ve smyslu minimalizace regulační odchylky požadované výstupní teploty od měřené výstupní teploty, ale zejména optimalizace využití jednotlivých kotlů kaskády a jejich výkonových stupňů. Situace by byla odlišná v případě, že by bylo možno jednotlivé zdroje kaskády řídit spojitě – zde by dávalo smysl zaměřit se na dodržení regulační odchylky. V tomto případě, kdy jsou jednotlivé prvky kaskády řízeny diskrétně ve dvou výkonových stupních, dává smysl zaměřit se zejména na optimalizaci využití těchto prvků. Řízení pro samostatné regulované okruhy ponecháváme původní a k úpravě současného řízení dochází pouze v části kaskády. Nové části řídicí soustavy jsou zachyceny na obrázku 4.1. Hlavní rozdíl spatřujeme v rozdělení regulace na dvě samostatné části, kdy každý z kotlů dostává samostatnou informaci o tom, jaká výstupní teplota je u něj požadována. Kaskádní regulátor zde slouží k regulaci teploty vody vystupující ze soustavy kotlů. Dále dostává sdružené informace z jednotlivých ovládajících bloků kotlů (dále jen K1 a K2). Hlavní úlohou kaskádního regulátoru je, že rozhoduje o počtu aktivních zařízení v kaskádě.

Schéma současného řízení kaskády kotlů je uvedeno na obrázku 4.1. Bloky K1 a K2 slouží k regulaci jednotlivých stupňů příslušných kotlů tak, aby bylo dosaženo požadované společné výstupní teploty vody z kaskády. Jedním ze vstupů do bloků K1, K2 je i teplota vody vracějící se z regulovaných okruhů, kdy tato teplota z důvodu ochrany kotlů nesmí klesnout pod hranici, kdy začne docházet ke nízko-teplotní kondenzaci kotle.



Obrázek 4.1.: Schéma nové regulace kaskády kotlů K1 a K2.

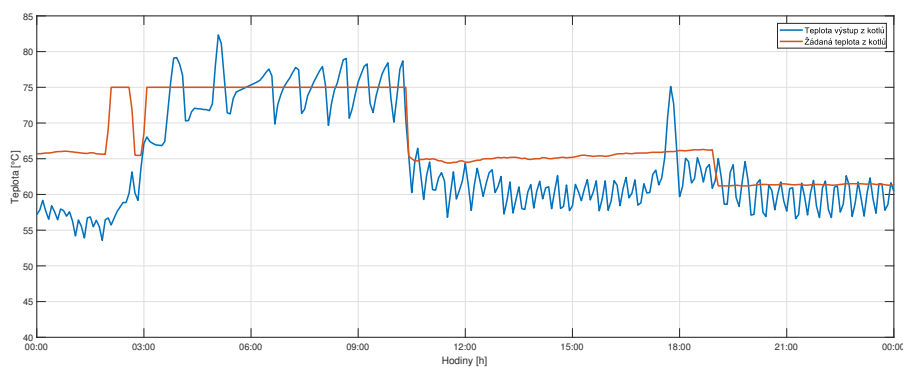
V grafech 4.2 a 4.3 je znázorněno porovnání původní implementace a nové implementace regulace. Pro porovnání kvality regulace byly vybrány dva dny s podobnými venkovními podmínkami. Je důležité zmínit, že jednodenní porovnání nepostihuje komplexní chování regulace. Pro kvalitní posouzení by bylo vhodné aplikovat nový návrh řízení po delší dobu. I přes tuto skutečnost již v současné chvíli můžeme tvrdit, že při aktuálních získaných datech dochází k výraznému zlepšení regulace. Získané poznatky mohou být promítnuty do dalšího vývoje a zlepšování jak regulace kaskády, tak jednotlivých výkonových stupňů kotlů.

Z grafu 4.2 popisujícího novou implementaci řízení je patrné zlepšení ve sledování požadované teploty, což nebylo naším cílem, ale můžeme jej považovat za přínosné v rámci zdokonalování systému. V první části grafu 4.2 si lze povšimnout, že v ranních hodinách regulace kotlů nedokázala zareagovat na požadovanou teplotu. Tato situace nastala z důvodu poruchy druhého kotle. I přes nastalou situaci došlo k uspokojivé regulaci prostřednictvím jednoho kotle v průběhu dne.

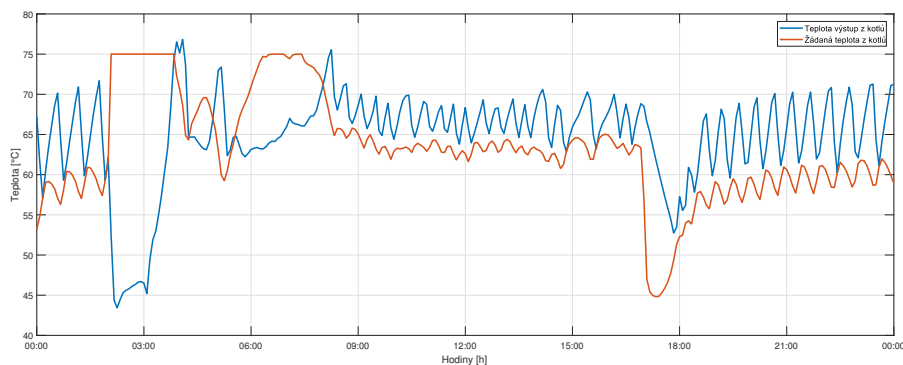
Ve stejném grafu 4.2 je možné si v jistých částech povšimnout navýšení měřené teploty oproti požadované. Tato skutečnost popisuje ochranný prostředek k zabránění kondenzace aktivní části kotle pomocí dostatečně vysoké teploty vracející se vody.

Následující tabulka 4.1 porovnává starou a novou implementaci řízení ve třech kategoriích (spínání prvního kotle, spínání druhého kotle, průměrná regulační odchylka). Lze z ní jasně vyčíst, že kotel v průběhu dne spínal méně často než při použití starého řízení, což bylo hlavním důvodem návrhu nové regulace. Díky tomuto faktu můžeme považovat návrh nové regulace za úspěšný, přestože dodržení regulační odchylky nebylo v kritériích návrhu nové implementace. Ze zmiňované tabulky je zřejmé, že došlo k jejímu snížení o 1,59 °C.

S novou implementací jsme dokázali optimalizovat jak celkové chování samotné regulace kaskády, tak i jednotlivých výkonových stupňů kotlů. Poznatky získané v průběhu vývoje byly aplikovány v reálném provozu kotelny, kdy navržená regulace již v současné době probíhá v rámci testů a v brzké době bude reálně používána pro regulaci této kotelny.



Obrázek 4.2.: Graf průběhů naměřených hodnot z původní implementace řízení.



Obrázek 4.3.: Graf průběhu z naměřených hodnot nové implementace řízení

Tabulka 4.1.: Porovnání provozních dat obou kotlů K1 a K2 při původním a novém řízení.

Denní srovnání	Staré řízení	Nové řízení
Počet sepnutí, kotel v prvním pořadí	77	38
Počet sepnutí, kotel v druhém pořadí	11	3
Průměrná odchylka $ e $ [°C]	3,09	1,58

NÁVRH OBECNÉ METODY ŘÍZENÍ

Pro návrh řídicího algoritmu pro kaskády kotlů bylo využito vývojové prostředí firmy Energo-centrum PLUS, s.r.o., (Merbon IDE). Tento program slouží pro programování a konfiguraci procesních programovatelných stanic PLC (Programmable Logic Controller). Vývojové prostředí podléhá normě *IEC 61131-3* standardizující programovací jazyky pro programovatelné automaty. Tato skutečnost výrazně zvyšuje univerzálnost a přenositelnost kódu. Další výhodou tohoto vývojového prostředí je možnost libovolného členění algoritmu do bloků a vytváření vlastních knihovnických prvků. Tato vlastnost velmi napomáhá zpřehlednění kódu. V software je možno psát kód dvěma způsoby:

- funkční bloky (dále jen FBD) – výhodou je možnost tvořit a opakovaně používat uživatelské funkční bloky
- strukturovaný text (dále jen ST) – tento jazyk je vhodným nástrojem pro definování komplexních funkčních bloků, které pak mohou být použity v jakémkoliv jiném programovacím jazyce

5.1. Návrh algoritmů pro řízení kaskády kotlů

Inspirací pro nový návrh byly staré implementace kaskádního a kotelního řízení. Výchozí řízení bylo navrženo ve vývojovém prostředí softPLC IDE. Vývoj v softPLC IDE připomíná programování pomocí funkčních bloků. Je však důležité zmínit, že vyvíjený software nespadá žádnému z aktuálních standardů. Nevýhodou tohoto vývojového prostředí je celková neuspořádanost, která přispívá k nepřehlednosti vyvíjeného algoritmu řízení. Pro usnadnění práce byly použity staré implementace algoritmů, jejich použití s sebou přinášelo komplikace v podobě zanášení chyb a celkové nepřehlednosti algoritmu. Z těchto důvodů bylo vytvořeno nové vývojové prostředí Merbon IDE.

V novém prostředí lze implementovat složité funkce do jednotlivých bloků a tím jednoduše vytvářet nové knihovní bloky. Pro vytvoření složitějších matematicko-logických operací lze využít strukturovaného textu. Výsledkem této práce by měl být vznik nových funkčních bloků jak pro řízení kaskády, tak i jejích jednotlivých částí. Požadavkem na výsledné provedení je přenositelnost a znovupoužitelnost daných bloků v algoritmech řídicích kotle se stejnými specifikacemi.

Na základě zkušeností získaných v kapitole 3 a požadavků definovaných výše došlo k vývoji univerzálních bloků pro řízení, popsanych v následujících podkapitolách. Tyto bloky jsou:

- kaskádní řízení
- řízení s dvoustupňovým hořákem
- řízení s dvoustupňovým hořákem s hlídáním vratné teploty
- řízení s modulovaným hořákem

5.1.1. Blok kaskádního řízení

Kaskádní řízení na obrázku 5.1 je postaveno na pomocném bloku integračního kritéria. Integrační kritérium slouží pro výpočet kladného integrálu a záporného integrálu za pomoci regulační odchylky

$$e(k) = y_{SP}(k) - y_M(k) \quad (5.1)$$

,kde

$e(k)$ je regulační odchylka v kroku k ,

$y_{SP}(k)$ je žádaná hodnota v kroku k ,

$y_M(k)$ je měřená hodnota v kroku k .

Regulační odchylka následně vstupuje na dva integrátory, které lze pospat tak, že první integrál slouží pro integraci kladného rozdílu ($y_{SP} > y_M$), který budeme označovat jako kladný integrál a druhý integrál slouží pro integraci záporného rozdílu ($y_{SP} < y_M$), který budeme označovat jako záporný integrál.

Pro vyloučení zákmitů okolo žádané hodnoty je vytvořeno pásmo necitlivosti, který je definováno

$$DZ \in \left(y_{SP} - \frac{DZ}{2}, y_{SP} + \frac{DZ}{2} \right) \quad (5.2)$$

Pokud se skutečná hodnota nachází v tomto pásmu nedochází k žádné integraci a výstupy obou integrátorů jsou nastaveny na nulové hodnoty.

Jakmile se skutečná hodnota dostane mimo toto pásmo, dojde k integraci příslušným integrátorem:

- měřená hodnota je menší než žádaná zmenšená o $\frac{DZ}{2}$, zvětšuje se kladný integrál, záporný zůstává nulový
- měřená hodnota je větší než žádaná zvětšená o $\frac{DZ}{2}$, zvětšuje se záporný integrál, kladný zůstává nulový

V každém kroku se porovnávají aktuální výstupy obou integrátorů s limitními hodnotami (dále jen *limitForAttach*). Kladný integrál se porovnává *limitForAttach*, záporný integrál s *LimitForDettach*, pokud v některém případě dojde k překročení těchto limitů a současně má odpovídající povolení povelu pro přidání zařízení (dále jen *canAttach*) nebo povolení povelu pro odebrání zařízení (dále jen *canDettach*) stav true, dojde k aktivaci příslušného výstupu povel pro přidání zařízení (dále jen *attachCmd*) nebo povolení k odebrání zařízení (dále jen *dettachCmd*) a následnému vynulování integrálu. Tím je blok připraven k dalšímu cyklu. Tím, že se limitní hodnoty porovnávají s hodnotou integrátorů mají tyto hodnoty daný fyzikální význam, jejich rozměr je dán jednotkou řízené veličiny a časem a ten se počítá v minutách, výsledná jednotka tedy může být např. °C · min.

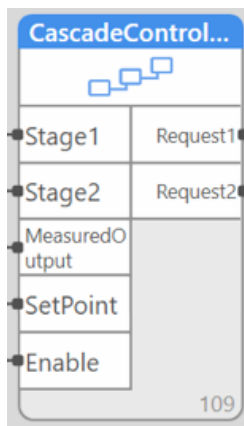
Kaskádní řízení slouží pro určení optimálního počtu aktivních zařízení pro dosažení žádané hodnoty společného výstupu. Základní zapojení je vždy blok kaskádního regulátoru s odpovídajícím počtem výstupních bloků pro daná zařízení. Blok umožňuje řídit kaskádu i pouze s pomocí čidla společného výstupu, nicméně pro zkvalitnění regulace je vhodnější mít čidla i pro jednotlivá zařízení. Kaskádní regulátor určuje, která zařízení budou v provozu a řídí jejich výkon, výstupní bloky zajišťují předání těchto požadavků konkrétnímu zařízení a ošetření provozních a poruchových stavů. Tyto stavy jsou následně předány zpět do kaskádního regulátoru.

Určování aktivních zařízení se děje na základě integrálních kritérií a na základě hlášení o stavu nejpozději přiřazeného zařízení (konkrétně jeho aktuálního výkonu). Pro aktivaci dalšího zařízení musí být tedy splněny následující podmínky:

- překročení limitu integrálního kritéria
- naposledy aktivované zařízení musí hlásit aktuální výkon 100 %

Přidáním dalšího zařízení se změní požadované výkony pro jednotlivá zařízení. Všem zařízením kromě posledního se nastaví požadovaný výkon na 100% a u posledního zařízení se provádí regulace podle režimu řízení daného výstupního bloku.

Pro deaktivaci platí podmínky opačné, pokud se zařízení deaktivuje, vypne se, přechází regulace na předchozí stupeň s tím, že začíná na 100% výkonu, aby nedošlo ke skokové ztrátě dodávaného výkonu, a tím k rozkmitání celého systému.



Obrázek 5.1.: Funkční blok kaskádní řízení z vývojového prostředí Merbon IDE

Vstupy:

- *stage1*, *stage2* – sdružený stav zařízení v kaskádě
- *measuredOutput* – skutečná hodnota regulované veličiny
- *setPoint* – žádaná hodnota regulované veličiny
- *enable* – povolení provozu

Výstupy:

- *request1*, *request2* – sdružené požadavky na 1. a 2. zařízení
- *failure* – sdružená porucha

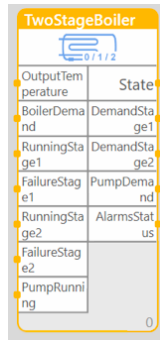
5.1.2. Blok řízení kotle s dvoustupňovým hořákem

Blok na obrázku 5.2 slouží pro řízení dvoustupňového kotle. Oba stupně jsou řízeny samostatně následujícím způsobem:

- 1. stupeň – k jeho řízení je použit termostat, jehož vstupem je buď společný nebo vlastní výstup a žádaná hodnota z kaskádního regulátoru. Hystereze tohoto termostatu se dynamicky nastavuje tak, aby byla splněna podmínka minimální doby chodu kotle a zároveň udržuje regulovanou teplotu v rozsahu od žádané do žádané plus hystereze (skutečná hodnota je tedy alespoň taková, jako je žádaná). Mohou nastat tyto dva případy:
 1. doba chodu je kratší – dojde ke zvětšení hystereze o $\frac{1}{3}$ její velikosti, a to až do maximální velikosti 15 °C.
 2. doba chodu je delší než je dvojnásobek minimální - dojde ke zmenšení hystereze o $\frac{1}{3}$ její hodnoty, a to až do minimální hodnoty 5 °C.
- 2. stupeň – k jeho řízení je využito integrálního kritéria, jehož vstupy jsou stejné jako pro první stupeň. Druhý stupeň je spínán pomocí požadavků *attachCmd* respektivě *dettachCmd* – při přidání se druhý stupeň aktivuje, při odebrání naopak deaktivuje

Oběhové čerpadlo se spouští spolu s povelem na první nebo druhý stupeň. Pouze v případě, kdy je kotel první v pořadí, je toto čerpadlo v provozu trvale (pokud je v automatickém režimu). Blok také vyhodnocuje následující chybové stavy:

- nefunkčnost hořáku – na základě rozdílnosti povelu a zpětné hlášky nebo přímo pomocí poruchového vstupu. Pokud dojde k této chybě, tak se inkrementuje v počítadle chyb (*failureCountLimit*). Pokud hodnota chyb v počítadle překročí hodnotu *failureCountLimit*, je kotel trvale nastaven do poruchy a vyřazen z kaskádního řízení. Dále je toto počítadlo vynulováno až po úspěšném startu tohoto kotle
- nefunkčnost oběhového čerpadla – vyhodnocována stejně jako nechod hořáku, jeho porucha má taktéž za následek vyřazení kotle z kaskádního řízení



Obrázek 5.2.: Funkční blok řízení kotle s dvoustupňovým hořákem z vývojového prostředí Merbon IDE

Vstupy:

- *outputTemperature* – výstupní teplota ze soustavy,
- *boilerDemand* -. požadavek na kotel z kaskádního regulátoru
- *runningStage1*, *RunningStage2* – zpětná hláška chodu kotle – 1. stupeň a 2. stupeň
- *failureStage1*, *FailureStage2* – zpětná hláška poruchy kotle - 1. stupeň a 2. stupeň
- *pumpRunning* – zpětná hláška chodu oběhového čerpadla

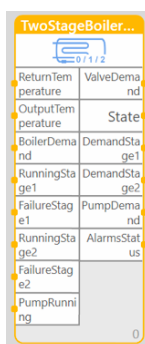
Výstupy:

- *state* – sdružený stav kotle do kaskádního regulátoru
- *demandStage1*, *demandStage2* – povel na 1. stupeň a 2. stupeň
- *pumpDemand* – povel na oběhové čerpadlo
- *failureOutput* – porucha kotle
- *alarmStatus* – sdružené rozhraní k alarmové indikaci

5.1.3. Blok řízení kotle s dvoustupňovým hořákem s hlídáním zpátečky

Popis řízení hořáku byl více popsán v předchozí kapitole. Tento blok na obrázku 5.3 implementuje řízení vratné teploty pomocí následujících metod:

- navyšování žádané teploty – navyšování je řízeno pomocí jednoduchého PI regulátoru, který provádí korekci žádané teploty z kaskádního regulátoru
- trojcestný ventil na vratném potrubí – zde dochází ke směšování teplé vody z výstupu kotle s chladnější vodou z otopné soustavy, a tím k navýšení teploty vratné vody do kotle
- zkratové čerpadlo – používá se při navyšování žádané teploty a současně se při rozdílu teplot výstupní a vratné vody, menším než je nastavená hystereze. Aktivuje se povel na zkratové čerpadlo/ventil zapojený mezi výstupním a vratným potrubím kotle



Obrázek 5.3.: Funkční blok řízení kotle s dvoustupňovým hořákem s hlídáním vratné vody z vývojového prostředí Merbon IDE

Vstupy:

- *returnTemperature* – teplota vratné vody
- *returnSetPoint* – žádaná teplota vratné vody
- *returnX_p* – PI regulátor – šířka pásma
- *returnT_i* – PI regulátor – integrační konstanta
- *returnHysteresis* – hystereze využita pro spínání zkratového čerpadla

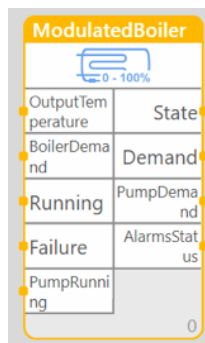
Výstupy:

- *valveDemand* – požadavek na otevření trojcestného ventilu
- *demandStage1*, *demandStage2* – povel na 1. stupeň a 2. stupeň
- *shortCircuitPumpDemand* – požadavek na zapnutí zkratového čerpadla

5.1.4. Blok řízení kotle s modulovaným hořákem

Blok na obrázku 5.4 slouží pro řízení kotle s modulovaným hořákem, jakožto pomocná logika pro kaskádní řízení. Hlavní funkcí je řešení poruchy kotlů a ovládání oběhového čerpadla. Výkon hořáků je řízen pomocí PI regulátoru umístěného v logice kaskádního řízení.

Oběhové čerpadlo se spouští spolu s povelom na sepnutí hořáku. V případě, kdy je kotel prvním prvkem kaskády, je toto čerpadlo v případě automatického režimu trvale v provozu. V opačném případě dochází k ovládání obsluhou kotelný.



Obrázek 5.4.: Funkční blok řízení kotle s modulovaným hořákem z vývojového prostředí Merbon IDE

Vstupy:

- *boilerDemand* – požadavek na kotel z kaskádního regulátoru
- *outputTemperature* – výstupní teplota ze soustavy
- X_p, T_i – PI regulátor (šířka pásma, integrační konstanta)
- *limitingXp, LimitingTi* – PI regulátor pro omezení maximální výstupní teploty (šířka pásma, integrační konstanta)
- *running* – zpětná hláška chodu kotle
- *failure* – Zpětná hláška poruchy kotle
- *pumpRunning* – Zpětná hláška chodu oběhového čerpadla

Výstupy:

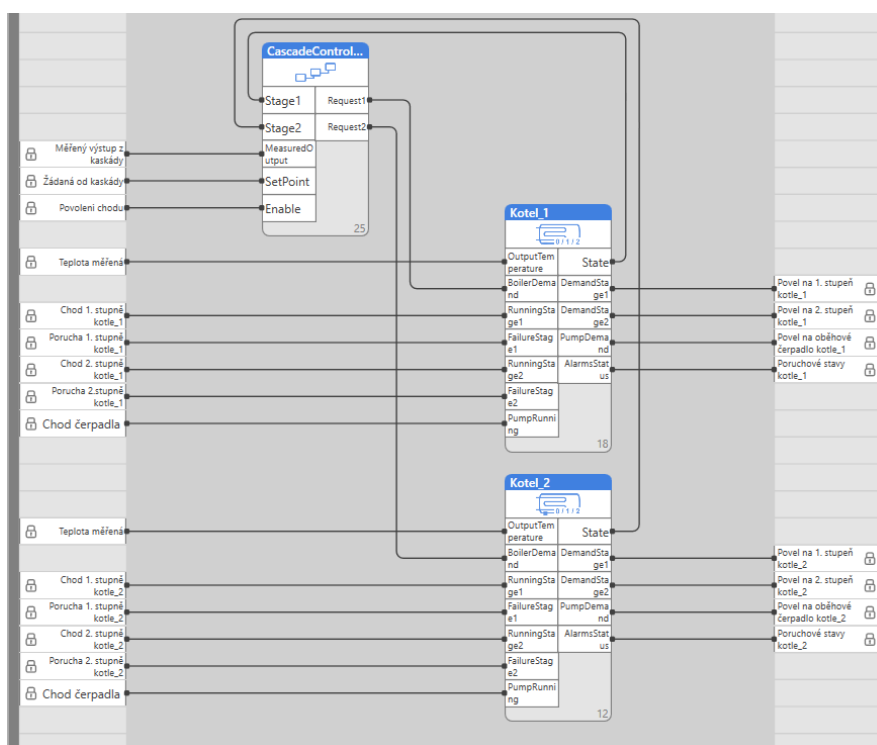
- *state* – sdružený stav kotle do kaskádního regulátoru
- *demand* – požadavek na výkon kotle
- *pumpDemand* – požadavek na oběhové čerpadlo
- *alarmStatus* – sdružené rozhraní k alarmové indikaci

5.2. Příklady použití navržených bloků

Tato část se bude zabývat využitím navržených funkčních bloků pro řízení kaskády se specifickými typy kotlů. Pro každý typ kotle je navržen speciální blok jeho řízení. V následujících podkapitolách si stručně představíme příklady využití těchto řídicích prvků.

5.2.1. Příklad kaskády s dvoustupňovým hořákem

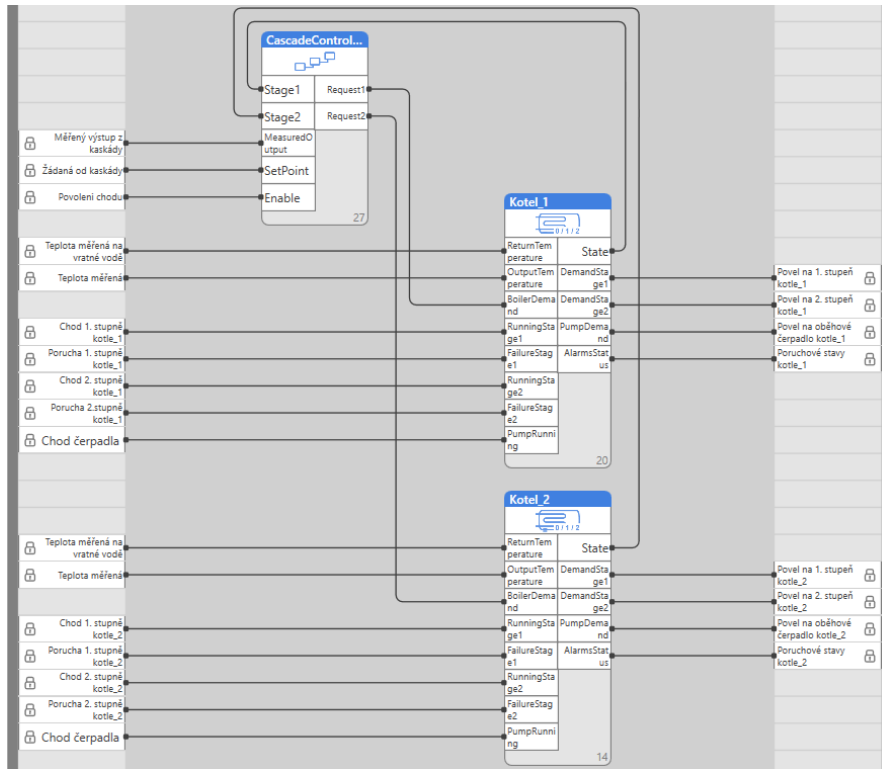
Na obrázku 5.5 je uvedený příklad využití kaskádního řízení, které řídí dva kotle s dvoustupňovými hořáky. Vstupní a výstupní veličiny jsou pouze ilustrativní a v reálných situacích mohou být odlišné.



Obrázek 5.5.: Schéma zapojení kaskády kotlů s dvoustupňovými hořáky ve vývojovém prostředí Merbon IDE

5.2.2. Příklad kaskády s dvěma kotli s dvoustupňovými hořáky a hlídanou zpátečkou

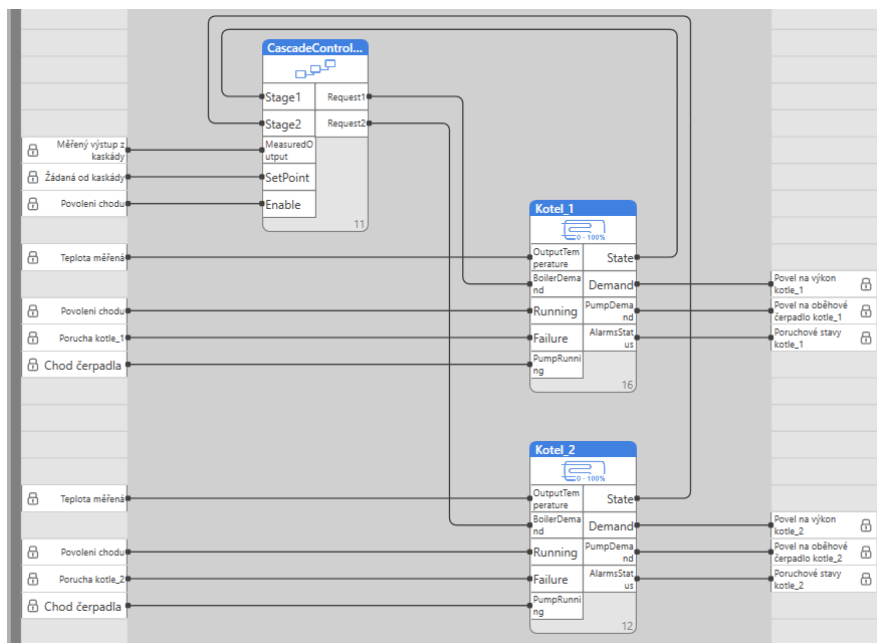
Na obrázku 5.6 se velmi podobá schématu předchozímu, kdy změnu představuje jiný blok typu kotle. Lze si povšimnout, že oproti předchozímu bloku kotle přibyl vstup představující měřenou teplotou na zpátečce a dva výstupy v podobě požadavků na otevření trojcestného ventilu a zapnutí zkratového čerpadla. V případě, kdy trojcestný ventil, či zkratové čerpadlo není součástí kotelny, výstupy *valveDemand* a *shortCircuitPumpDemand* se nepoužívají.



Obrázek 5.6.: Schéma zapojení kaskády kotlů s dvoustupňovými hořáky a hlídanou zpátečkou ve vývojovém prostředí Merbon IDE

5.2.3. Příklad kaskády s modulovaným hořákem

V této podkapitole je znázorněna na obrázku 5.7 kaskáda kotlů s modulovaným hořákem. Tento typ hořáku se na rozdíl od předchozích typů řízení řídí spojitě, což má za následek jednodušší řízení regulační odchylky požadované a výstupní teploty v topných soustavách.



Obrázek 5.7.: Schéma zapojení kaskády se dvěma kotli s modulovaným hořákem ve vývojovém prostředí Merbon IDE

ZÁVĚR

Cílem této práce bylo analyzovat a následně navrhnout nové řízení pro kaskádu kotlů. V úvodu práce jsme se zabývali vysvětlením základních pojmů a principů spojených s tepelnými zdroji, kdy v dalších podkapitolách byly na základě těchto pojmů vysvětleny používané způsoby regulace tepelných zdrojů.

V následující kapitole jsme se zabývali analýzou kvality regulace kaskády kotlů. Pro analýzu schopnosti udržení regulované teploty od požadované teploty v žádaných mezích byla ze získaných dat společnosti Energocentrum PLUS, s. r. o., vybrána specifická část, ve které je daná regulace nejvíce vytížená.

U ostatních kritérií, jimiž jsou procentuální vytížení kotlů a četnost přepínání jejich jednotlivých výkonových stupňů, byla již použita data kompletní. Z vyvozených závěrů usuzujeme, že v případě prvního kritéria, jímž je minimalizování regulační odchylky od požadované teploty, je daná regulace neefektivní. Bylo zjištěno, že daná regulace se řídí podle odlišné teploty, než je teplota požadovaná.

V případě procentuálního využití jednotlivých kotlů v kaskádě v měřené době jsme prokázali, že daná zařízení byla využita rovnoměrně.

Posledním kritériem postihujícím kvalitu regulace je četnost přepínání jednotlivých výkonových stupňů kaskády. Bylo zjištěno, že dochází k velmi častému přechodu mezi jednotlivými stavy.

Na základě výsledků z analytické části této práce dochází ve třetí části k návrhu nové implementace řízení kaskády kotlů. Návrh oproti původní regulaci obsahuje nové regulační prvky, které jsou použity díky rozdělení původní regulace na několik samostatných regulačních úloh.

Nový návrh byl odborně prostudován zástupci firmy Energocentrum PLUS, s. r. o., a následně došlo k aplikaci tohoto řízení v reálném zařízení. Na základě získaných dat o nové regulaci, která je v aktuální době v provozu, poskytuje tato práce v kapitole 4 porovnání původní a současné regulace.

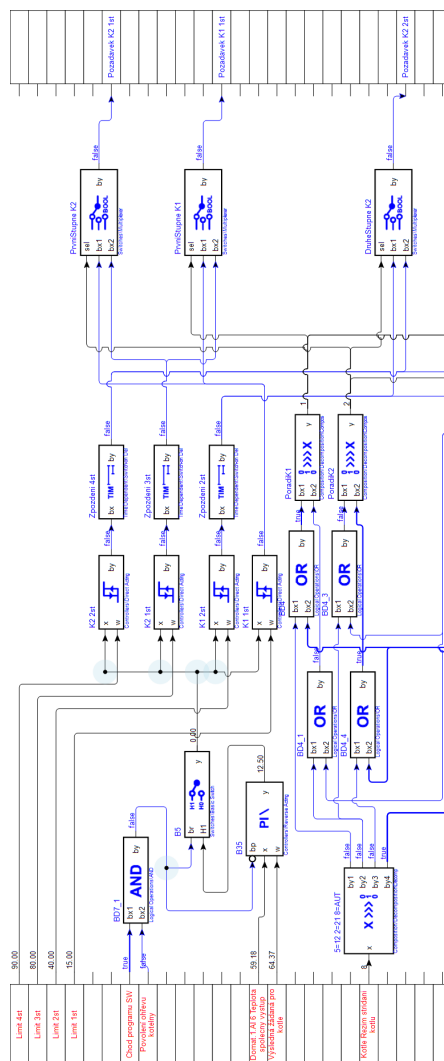
V závěru této práce dochází k přenesení získaných poznatků do praxe, kdy v rámci poslední kapitoly byl popsán návrh implementace obecných regulačních bloků pomocí programovacího jazyka function block diagram (FBD), které by v budoucnosti měly poskytovat firmě Energo-centrum PLUS, s. r. o., modularitu a rozšiřitelnost nově vzniklých regulačních systémů.

LITERATURA

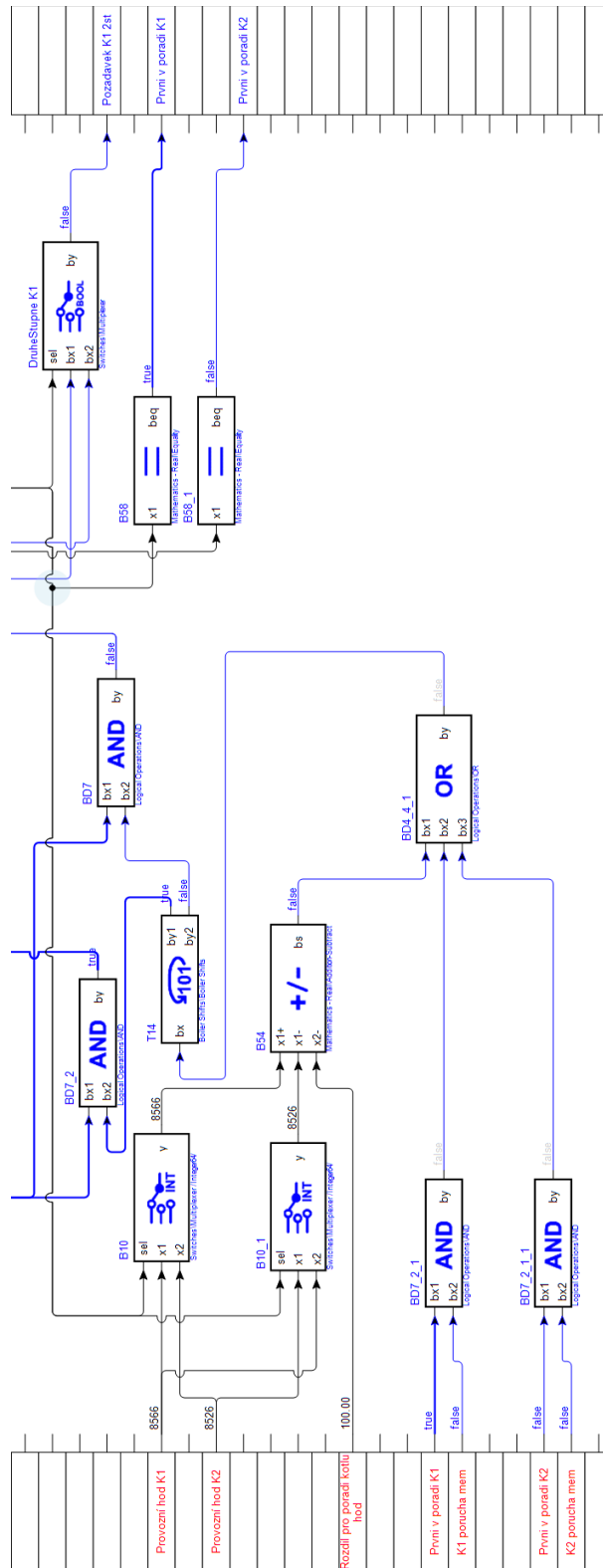
- [1] BAŠTA, Jiří. *Regulace v technice prostředí staveb*. Praha: ČVUT, 2014. 193 s. ISBN 978-80-01-05455-0.
- [2] BAŠTA, Jiří. *Hydraulika a řízení otopných soustav*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. 252 s. ISBN 80-01-02808-9.
- [3] Prediktivní řízení soustav vytápění budov [online]. Ing. Jan Široký, Ing. Jan Kubeček, 2011 [cit. 2017-04-16]. Dostupné z: <http://m.tzb-info.cz/mereni-a-regulace/7541-prediktivni-rizeni-soustav-vytapeni-budov>
- [4] Control of heating plants [online]. Switzerland: Siemens Switzerland, 2004 [cit. 2017-05-6]. Dostupné z: <https://www.downloads.siemens.com/download-center/Download.aspx?pos=download&fct=getasset&id1=8363>
- [5] *Hydraulická stabilita soustav s čerpadly s řízenými otáčkami oběžného kola. Vytápění, větrání, instalace*. Praha: Společnost pro techniku prostředí, 2014, 23(2). Dostupné také z: http://www.ingmatejicek.cz/clanky/Matejicek_04_2014_ko03_sch.pdf
- [6] KASKÁDY KOTLŮ A JEJICH ŘÍZENÍ. Brno, 2012. Dostupné také z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=55724. Bakalářská práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Ing. Marian Formánek Ph.D.
- [7] Kadlec K., Kmínek M, Kadlec P. a kolektiv, *Měření a řízení v potravinářských a biotechnologických výroбах*, KEY Publishing, Ostrava, 2015 , ISBN 978-80-7418-232-7
- [8] Prediktivní řízení založené na modelu: Hlavní principy (Model Predictive Control - MPC) [online]. [cit. 2017-04-22]. Dostupné z: www.fm.tul.cz/esf0247/index.php?download=670

- [9] MAREŠ, Jan a Pavel HRNČIŘÍK. *Základy prediktivního řízení*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2012. ISBN 978-80-7080-823-8.
- [10] Teoretická část: Vytápění [online]. [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/176/02.html>
- [11] Industria AC a. s.: Vytápění [online]. [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: <http://www.industriaac.cz/references/energetika-21.html>
- [12] UCHYTIL s. r. o.: Vytápění [online]. [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: <http://www.uchytil.eu/kotelny-plyn>

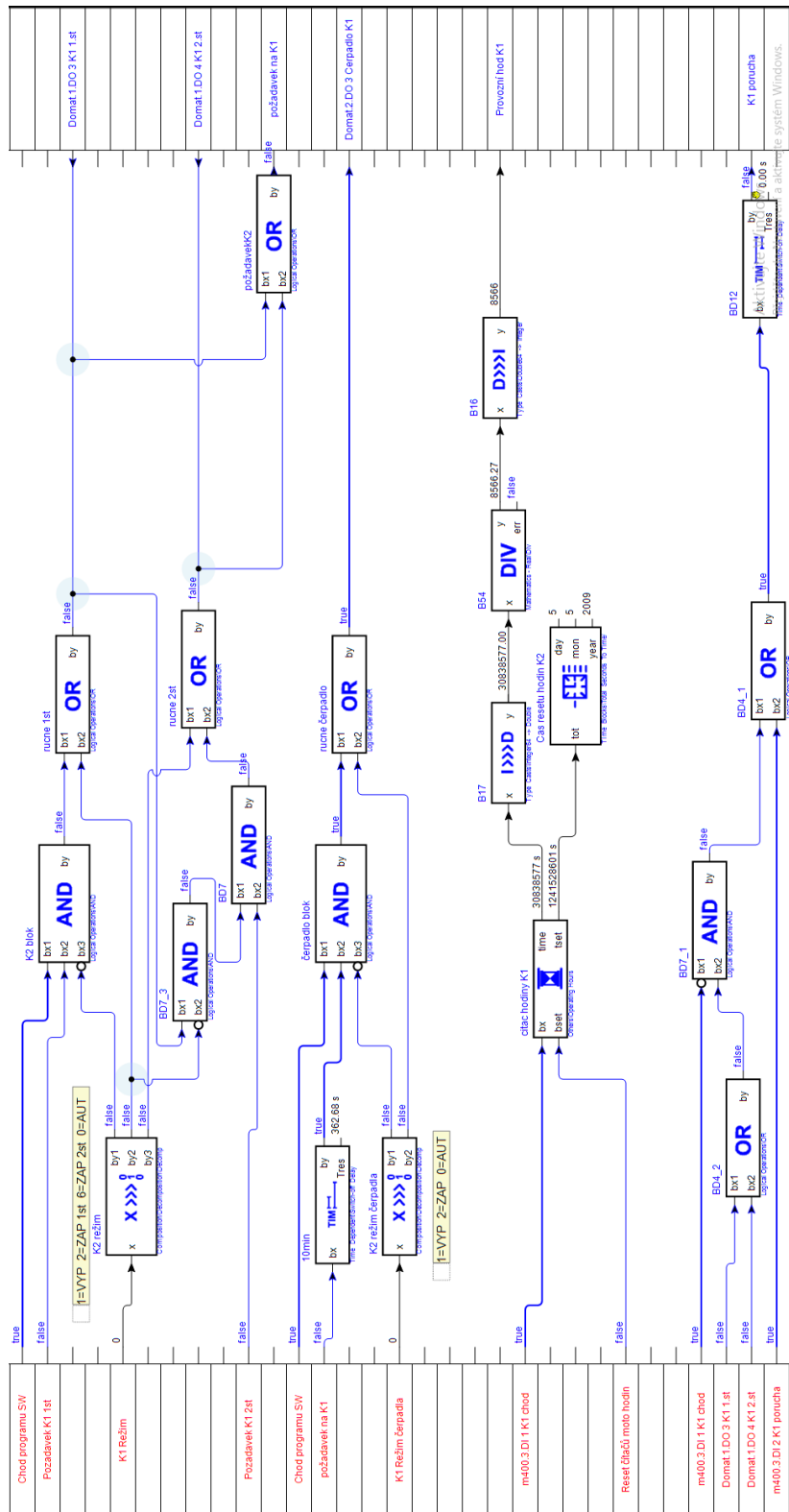
Přílohy

PROGRAMOVÁ ČÁST PŮVODNÍ IMPLEMENTACE V SOFTPLC
IDE

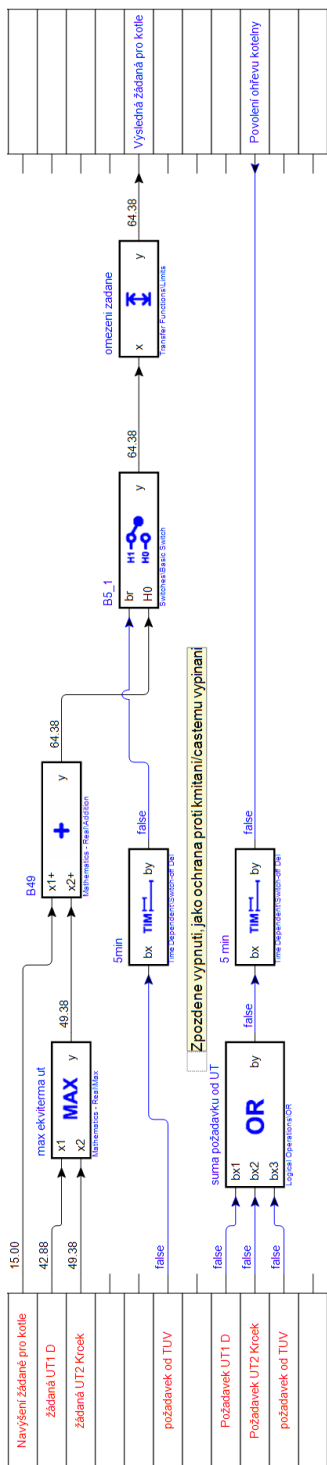
Obrázek A.1.: Schéma řízení kaskády kotlů 1. část



Obrazek A.2.: Schéma řízení kaskády kotlů 2.část

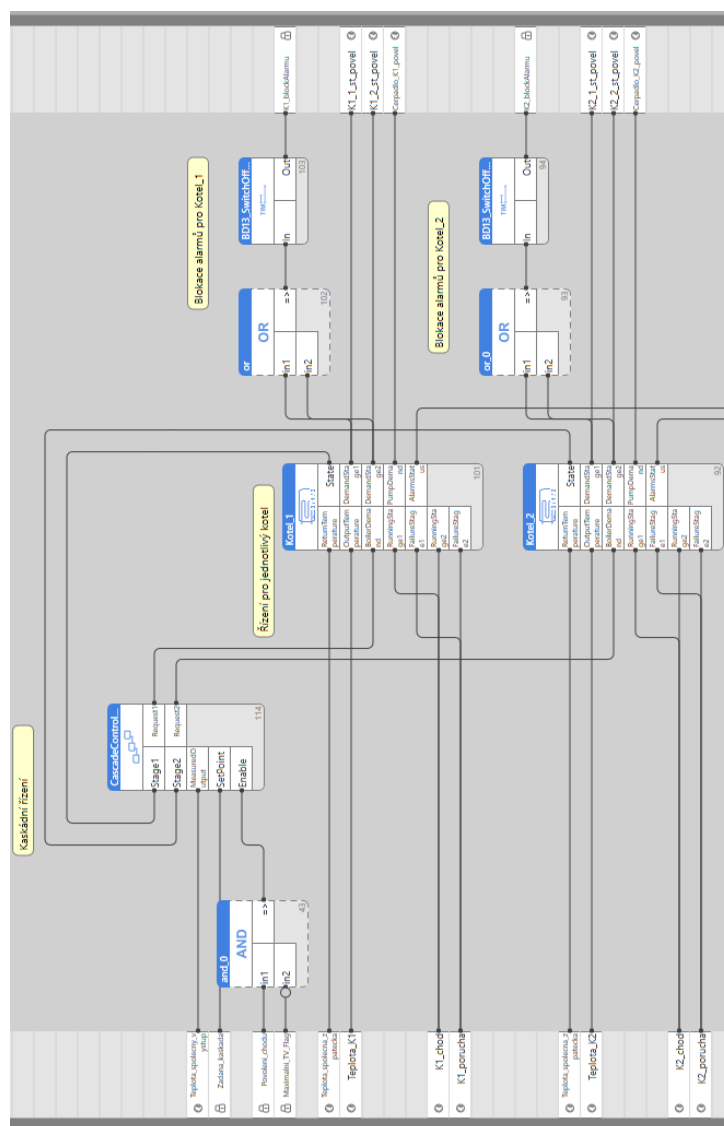


Obrázek A.3.: Schéma řízení jednotlivých kotlů

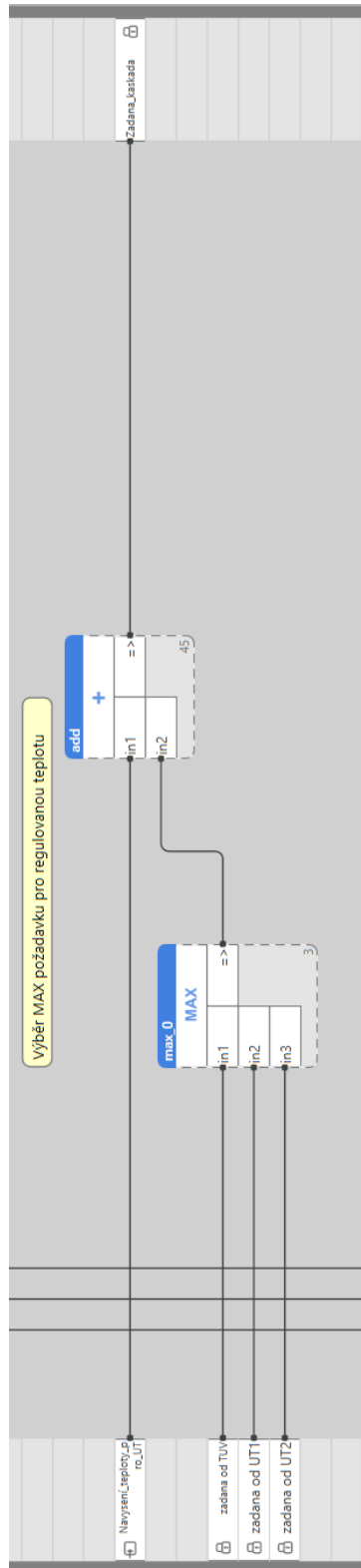


Obrázek A.4.: Schéma pro řízení požadované teploty

PROGRAMOVÁ ČÁST NOVÉ IMPLEMENTACE V MERBON IDE



Obrázek B.1.: Schéma řízení kaskády kotlů a jednotlivých kotlů



Obrázek B.2.: Schéma výběru požadované teploty pro ohřev

OBSAH CD-ROM

Přiložené CD-ROM obsahuje:

- Elektronickou část této práce
- Zdrojový kód staré implementace řízení
- Zdrojový kód nové implementace řízení
- Grafy