



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI  
Fakulta mechatroniky, informatiky  
a mezioborových studií ■

# Optimalizace řízení kaskády kondenzačních kotlů

## Diplomová práce

*Studijní program:* N2612 – Elektrotechnika a informatika  
*Studijní obor:* 3902T005 – Automatické řízení a inženýrská informatika  
*Autor práce:* **Bc. Lukáš Vele**  
*Vedoucí práce:* Ing. Lukáš Hubka, Ph.D.





TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC  
Faculty of Mechatronics, Informatics  
and Interdisciplinary Studies ■

# The Control Algorithm Optimization for Condensation Boilers in Cascade Structure

## Master thesis

*Study programme:* N2612 – Electrical Engineering and Informatics  
*Study branch:* 3902T005 – Automatic Control and Applied Computer Science  
*Author:* **Bc. Lukáš Vele**  
*Supervisor:* Ing. Lukáš Hubka, Ph.D.





Zadání diplomové práce

## Optimalizace řízení kaskády kondenzačních kotlů

*Jméno a příjmení:* **Bc. Lukáš Vele**  
*Osobní číslo:* M17000145  
*Studijní program:* N2612 Elektrotechnika a informatika  
*Studijní obor:* Automatické řízení a inženýrská informatika  
*Zadávající katedra:* Ústav mechatroniky a technické informatiky  
*Akademický rok:* **2018/2019**

### **Zásady pro vypracování:**

1. Rozeberte běžně používané metody řízení kaskády plynových kondenzačních či jiných kotlů.
2. Vytvořte metodiku určující optimální počet aktivních kotlů pro aktuální tepelné zatížení.
3. Analyzujte účinnost kondenzačních kotlů v závislosti na provozních podmínkách.
4. Měřeními na daném kotli zjistěte jeho účinnost v celém výkonovém rozsahu.
5. Navrhněte úpravu řídicího algoritmu kotle vedoucí ke zvýšení efektivity provozu.

*Rozsah grafických prací:* dle potřeby dokumentace  
*Rozsah pracovní zprávy:* 40–50 stran  
*Forma zpracování práce:* tištěná/elektronická



### **Seznam odborné literatury:**

- [1] BAŠTA, Jiří, Řízení kotlů v kaskádě. Vytápění, větrání, instalace. Praha: Společnost pro techniku prostředí, 2011. Issue 2, 2011, s. 50-55. ISSN 1210-1389.
- [2] Siemens Ltd., Control of heating plants. Switzerland 2004.
- [3] TZB-info. [Online] <http://www.tzb-info.cz>

*Vedoucí práce:* Ing. Lukáš Hubka, Ph.D.  
Ústav mechatroniky a technické informatiky  
*Datum zadání práce:* 10. října 2018  
*Předpokládaný termín odevzdání:* 30. dubna 2019

L. S.

prof. Ing. Zdeněk Plíva, Ph.D.  
děkan

doc. Ing. Milan Kolář, CSc.  
vedoucí ústavu

V Liberci 10. října 2018

## Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že texty tištěné verze práce a elektronické verze práce vložené do IS STAG se shodují.

28. 4. 2019

Bc. Lukáš Vele

## Poděkování

Tímto chci poděkovat Ing. Lukáši Hubkovi Ph.D. za odborné vedení při psaní diplomové práce. Dále děkuji své rodině za podporu jak při psaní práce, tak při studiu samotném.

## Abstrakt

Práce se zabývá optimalizací kaskády kondenzačních kotlů. V teoretické části jsou rozebrány běžně užívané kotle a jejich základní vlastnosti. Dále jsou zde popsány regulační strategie řízení kaskády kotlů a jejich možná zapojení. V praktické části práce jsou testovány vlastnosti konkrétního kondenzačního kotle v závislosti na teplotě vratné vody a výkonu. Následně je vytvořen model kaskády, na kterém jsou testovány řídicí algoritmy. Závěrem práce jsou vypsány a zhodnoceny dosažené výsledky.

*Klíčová slova: Kaskáda kotlů, kondenzační kotel, model kotle, optimalizace.*

## Abstract

This thesis focuses on optimization of cascade of condensing boilers. Theoretical part is about commonly used boilers and their properties. Next part is describing cascade control strategies and possible connections of boilers. Practical part of the thesis begins with measurement of chosen condensing boiler depending on the temperature of the water on return from the system and power level of the boiler. Following part is about creating a cascade boiler model which is used for testing control algorithms. Final part is about description and evaluation of the achieved results.

*Key words: Boiler cascade, condensing boiler, boiler model, optimization*

## Obsah

1	Úvod .....	9
2	Druhy kotlů.....	11
2.1	Plynový kotel .....	11
2.2	Plynový kondenzační kotel .....	11
2.3	Elektrokotel .....	15
2.4	Kotel na tuhá paliva .....	15
3	Regulace tepelných zdrojů v kaskádě.....	16
3.1	Podle venkovní teploty.....	16
3.2	Podle teploty kotlové vody.....	17
3.3	Podle výstupní teploty vody.....	17
3.4	Podle teploty vratné vody.....	18
3.5	Podle zátěže.....	18
3.6	Podle rozdílu teplot přívodní vody a zpátečky.....	18
4	Princip zapojení kotlů v kaskádě.....	19
4.1	Sériové zapojení .....	19
4.2	Paralelní zapojení .....	20
4.3	Termohydraulický rozdělovač .....	20
5	Měření vlastností kondenzačního kotle .....	22
5.1	Příkon kotle .....	24
5.2	Účinnost spalování .....	27
5.3	Teplota spalin .....	28
5.4	Teplota topné vody.....	30
5.5	Spotřeba paliva.....	31
6	Model kaskády.....	33
6.1	Vývojové prostředí Simscape .....	33
6.2	Blokové schéma modelu .....	33
6.3	Spalovací komora.....	34
6.4	Příprava paliva .....	38
6.5	Řízení kaskády .....	40
6.6	Řízení kotlů .....	41
7	Stávající strategie řízení .....	45



8	Optimalizace nákladů na provoz .....	47
8.1	Výpočet nákladů na provoz.....	47
8.2	Simulace konstantního požadavku.....	48
8.3	Simulace připínání kotlů .....	51
8.4	Simulace odepínání kotlů.....	53
8.5	Simulace reálných podmínek .....	55
9	Závěr.....	57

## Seznam obrázků

Obrázek 1 - Schéma kondenzačního kotle [6] .....	12
Obrázek 2 - Využití energie u kondenzačního kotle [8] .....	14
Obrázek 3 - Ekvitermní křivky - příklad [14] .....	16
Obrázek 4 - Sériové zapojení kotlů .....	19
Obrázek 5 - Paralelní zapojení kotlů .....	20
Obrázek 6 - Princip zapojení topného systému s THR .....	21
Obrázek 7 - Hydraulické schéma měření .....	23
Obrázek 8 - Příkon kotle - graf .....	25
Obrázek 9 - Normovaný stupeň účinnosti - graf .....	28
Obrázek 10 - Teplota spalin - graf .....	29
Obrázek 11 - Teplota topné vody - graf .....	31
Obrázek 12 - Spotřebovaný plyn - graf .....	32
Obrázek 13 - Blokové schéma modelu .....	34
Obrázek 14 - Schéma integračního kritéria .....	41
Obrázek 15 - Schéma vyhodnocování požadavků na kotle .....	42
Obrázek 16 - Generování pauzy .....	42
Obrázek 17 - Požadavky na kaskádu .....	43
Obrázek 18 - Stavy kotlů v kaskádě .....	44
Obrázek 19 - Systém střídání kotlů .....	46
Obrázek 20 - Schéma výpočtu spotřeby .....	48
Obrázek 21 - Graf zisků při nízkém vytížení kaskády .....	49
Obrázek 22 - Graf zisků kotelny .....	50
Obrázek 23 - Závislost nákladů na prahu připínání .....	52
Obrázek 24 - Zvyšování nároků na výkon .....	52
Obrázek 25 - Závislost nákladů na prahu odepínání .....	53
Obrázek 26 - Snižování nároků na výkon .....	54
Obrázek 27 - Simulace reálného zatížení kaskády .....	55

## Seznam tabulek

Tabulka 1 - Příkon kotle.....	24
Tabulka 2 - Přesnost wattmetru [17].....	26
Tabulka 3 - Normovaný stupeň účinnosti.....	27
Tabulka 4 - Teplota spalin .....	28
Tabulka 5 - Teplota topné vody .....	30
Tabulka 6 - Spotřeba plynu .....	31
Tabulka 7 - Srovnání nákladů na provoz kaskády 1 .....	49
Tabulka 8 - Srovnání nákladů na provoz kaskády 2 .....	50

## 1 Úvod

Stále častěji se v novinách i na internetu vyskytují články o rostoucím vlivu člověka na životní prostředí. Světová zásoba fosilních paliv není neomezená a dříve či později dojde k jejich úplnému vyčerpání. Zásoby zemního plynu nejsou na tak kritické hladině jako zásoby ropy, ale snižování jeho spotřeby je prvním krokem k oddálení blížící se energetické krize.

Nadnárodní organizace vytváří požadavky na výrobce HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning) systémů s cílem neustálého zvyšování efektivity provozu [1]. Z pohledu spotřeby zemního plynu se za optimální řešení vytápění považuje plynový kondenzační kotel. Tyto jednotky jsou schopny využít téměř veškerou energii, kterou dodaný plyn obsahuje. Energie ve formě tepla, která by u konvenčních kotlů odešla komínem, je pomocí změny skupenství vodní páry ve spalinách získána zpět, což umožní snížit spotřebu paliva při zachování komfortu.

Větší domy, zejména bytové jednotky, které nejsou připojeny na teplovody, jsou zpravidla vybaveny kotelnou. Tato kotelna obsahuje jeden nebo více kotlů, které zajišťují výrobu a dodávku tepla do objektu. V případě použití více kotlů jsou řazeny do tzv. kaskády, ve které spolu jednotky komunikují a navenek se chovají jako jeden tepelný zdroj o součtovém výkonu jednotlivých kotlů. Tuto kaskádu je obecně nutné řídit tak, aby pracovala s pokud možno nejvyšší dostupnou účinností. Hlavní výhodou soustavy s více kotli oproti využití menšího počtu výkonějších kotlů je provozní spolehlivost. V případě poruchy jedné z jednotek není objekt odstaven od dodávky tepelné energie, protože zbylé funkční jednotky požadovaný výkon do určité míry dokáží pokrýt. Nevýhodou jsou náklady na údržbu, které se s vyšším počtem kotlů zvyšují [2]. Optimalizace kaskády kondenzačních kotlů je úkol, který vzešel z požadavku společnosti Jablotron Living Technology CZ s.r.o. Spíše než o zlepšení provozních vlastností určité kotelny se jedná o hledání cesty pro případnou optimalizaci.

Na úvod byla provedena rešerše dostupných zdrojů a vypracován přehled základních možností vytápění objektů a jejich výhody a nevýhody. Následně je vytvořen seznam různých technik řízení kotlů v kaskádě s popisem vlastností a případných výhod a nevýhod. Problematika kondenzační techniky, zejména kondenzačních kotlů, je velmi podrobně vysvětlena spolu s nejasnostmi ve vnímání účinnosti těchto jednotek. Dále se

zde vysvětluje rozdíl mezi účinností a normovaným stupněm využití, na což navazuje seznámení s hydraulickým uspořádáním jednotlivých prvků topných systémů.

Velká pozornost byla kladena na měření vlastností konkrétního kondenzačního kotle Jablotron Aura L, které doprovázela nutnost vhodného návrhu topného okruhu tak, aby bylo možné simulovat veškeré předem zvolené stavy. Největším problémem bylo zajistit stálou teplotu zpátečky. Po zvážení možných řešení bylo přistoupeno k využití akumulární nádoby o objemu 285 l jako zásobu topné vody. Této nádobě byla tlakově oddělenou chladící vodou z tepelného čerpadla stále snižována teplota. Tento návrh ještě nezaručoval přesnou regulaci teploty zpátečky, bylo tedy nutné před vstup do kotle vložit třicestný ventil, kterým bylo s obtížemi doprovázející jakékoli řízení tepelných soustav možné řídit teplotu vstupní vody do kotle. Po sestavení popsané soustavy a volbě vhodných měřicích přístrojů se měřily následující veličiny: příkon, spotřeba paliva, účinnost spalování, teplota spalin a teplota topné vody. Všechny tyto veličiny se měřily v závislosti na výkonu kotle a v závislosti na teplotě zpátečky. Celkově proběhlo 70 různých nastavení. Nalezené závislosti byly vyhodnoceny, konzultovány a následně aplikovány do návrhu modelu, který funkčně a svými vlastnostmi odpovídal testovanému kotli.

Po seznámení s termodynamickými ději, které se odehrávají uvnitř kondenzačního kotle a prostředím Simscape bylo možné vytvořit model spalovací komory a výměníku. Tento kotel bylo dále nutné nadimenzovat takovým způsobem, aby odpovídal skutečnému kotli. Dimenzování probíhalo především hledáním vhodného průtoku plynu a také tvorbou vlastností jak plynu, tak samotného kotle. Po vytvoření modelu kotle bylo možné vhodným zapojením vytvořit kotlovou kaskádu, na které probíhaly veškeré experimenty, s cílem nalezení optimálního počtu aktivních kotlů při definovaném zatížení. Pro lepší přehlednost je v textu model rozepsán do jednotlivých bloků, jejichž funkce jsou vysvětleny separátně. Pro návrh řízení kaskády byl zvolen počet tří kotlů. Tato volba vyplynula z dostatku výstupních informací a také z důvodu omezeného výpočetního výkonu. Na závěr je na vyvinutém modelu otestována funkčnost návrhu pro reálné hodnoty zatížení a jsou vyhodnoceny přínosy nalezené strategie spínání a vypínání kotlů.

## 2 Druhy kotlů

Při stavbě nového domu nebo bytové jednotky se musí nalézt způsob, jak bude do daného objektu dodávána tepelná energie. Možností je několik [3]. Od kotle na tuhá paliva přes plynové kotle až k elektrokotlům. Tato kapitola se zaměřuje na popis funkce jednotlivých tepelných zdrojů. Největší pozornost je zde věnována kondenzačním jednotkám.

### 2.1 Plynový kotel

V šetření z roku 2015 vychází, že nejrozšířenější palivo určené k vytápění je zemní plyn [4]. S vytápěním založeném na tomto principu je svázaná automatizace provozu, což ještě zvyšuje komfort zákazníků. Oproti elektrokotlům, které disponují stejnou úrovní komfortu, jsou plynové jednotky nákladnější na zařízení, ale jejich náklady na provoz bývají zpravidla nižší [3]. Plynový kotel pracuje na principu získávání tepelné energie spalováním plynu (obvykle metan, propan, butan). Teplo se dále přes výměník předává otopné vodě, která ho distribuuje do otopné soustavy.

Konvenční plynový kotel pracuje obvykle s teplotou vratné vody kolem 60 °C, což zamezuje kondenzaci a nízkoteplotní korozi. Teplota spalin se pohybuje mezi 130 – 180 °C a účinnost těchto jednotek bývá 91 %. [5]

Nízkoteplotní plynové kotle jsou dimenzované tak, aby odolávaly korozi. Umožňují tak přivádět na svůj vstup vodu ze soustavy o teplotě pod rosným bodem spalin, tedy 35 – 40 °C. Dochází tedy k občasné kondenzaci spalin a zvyšuje se účinnost na hodnoty kolem 93 %. [5]

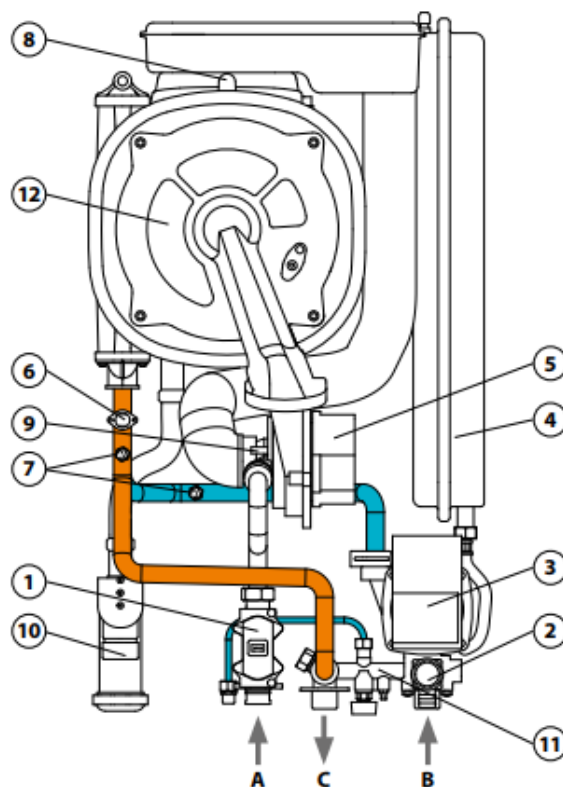
### 2.2 Plynový kondenzační kotel

Spalováním zemního plynu vzniká oxid uhličitý a také určité množství vody, které se spálením přemění na páru. Pára uniká se spalinami odvodem do ovzduší. Unikající teplo se u obyčejných plynových kotlů nevyužívá. Kondenzační kotle, jak už název napovídá, pomocí kondenzace vodní páry získávají část latentního tepla zpět do soustavy ve formě predehřevu vratné vody. Aby kondenzace mohla proběhnout, musí se zajistit ochlazení spalin pod teplotu rosného bodu, tedy držet teplotu vratné vody pod definovanou mezí. V případě, že by se spaliny nepodařilo dostatečně ochladit, kondenzace nenastane.

### THERM 18 KD, 25 KD

- 1 - Plynový ventil
- 2 - Pojistný ventil
- 3 - Oběhové čerpadlo
- 4 - Expanzní nádoba topení
- 5 - Ventilátor
- 6 - Havarijní termostat
- 7 - Teplotní sonda
- 8 - Teplotní sonda spalin
- 9 - Mixér
- 10 - Zápachová uzávěrka (sifon)
- 11 - Hydroblok
- 12 - Kondenzační těleso

- A - Vstup plynu  
B - Vstup vratné vody  
C - Výstup topné vody



Obrázek 1 - Schéma kondenzačního kotle [6]

K popisu funkce kondenzačního kotle je použit kotel THERM 18 KD značky THERMONA. Portem A přichází do kotle plyn, jehož průtok určuje plynový ventil. Plyn pak pokračuje do tzv. mixéru, kde se mísí se vzduchem a vytváří tak hořlavou směs. Poměr vzduchu a plynu se realizuje spoluprací ventilátoru, zmíněného řízeného plynového ventilu a řídicí jednotkou kotle. Všechny zmíněné komponenty musí být sladěny dohromady a díky zpětné vazbě ve formě elektrického signálu snímaného elektrodou, umístěnou přímo v plamenu, je možné najít optimální nastavení pro aktuální stav.

Vzniklá směs je přivedena do hořáku, umístěném v nerezovém výměníku. Pro plynové kotle je materiál, ze kterého je výměník vyroben naprosto klíčový, protože tato část kotle podléhá největšímu teplotnímu zatížení. Zároveň tvar teplosměnných ploch také vypovídá o efektivitě předávání tepla a tedy účinnosti celé jednotky. Specifický je pro kondenzační kotle vznik kondenzátu, jehož působení musí výměník taktéž odolat. Z důvodu prodloužení životnosti výměníku se instaluje na potrubí vstupní vody (zpátečky) filtr. Objem výměníku vychází z výkonu daného kotle. Soukup v [7] uvádí poměr 0,09 litru na 1 kW výkonu. Konstrukce obvykle připouští teplotní rozdíl horké vody a zpátečky maximálně 20 K. Kromě softwarových ošetření nežádoucích stavů (například příliš

prudkého nárůstu teploty v kotli) obsahují kotle bezpečnostní obvod s havarijním termostatem hlídajícím nepřekročení maximální provozní teploty.

Výměníky jsou vyvíjeny s cílem efektivního předání energie. V kontextu kotlových výměníků se nejčastěji hovoří o protiproudých výměnících, kde přichází do kontaktu chladná voda s chladnými spalinami a udržuje se stálý teplotní rozdíl, čímž se oproti souproudé variantě zvyšuje celkové předané teplo. Tím se zaručí, že v každé jednotlivé části přijímá voda energii. Teoreticky lze docílit ochlazení teploty spalin až na teplotu zpátečky. Speciální případ konstrukce výměníků umožňuje dvouokruhovou soustavu, ze které je možné vybrat chladnější zpátečku a tu přivést na vstup, určený pro kondenzaci. Takové výměníky se ovšem nachází spíše u stacionárních kotlů s větším výkonem, používaných například pro kaskády.

Na výměníku (číslo 12 [Obrázek 1]) je zapalovací elektroda, která vytváří elektrickou jiskru pro vznícení směsi. Kontrola plamene probíhá s pomocí samostatné ionizační elektrody, nebo jsou zapalovací i ionizační sdruženy do jedné. Kontrola plamene funguje na principu elektrické vodivosti plamene – ionty vzniklé při spalování uzavírají elektrický obvod mezi hořákem a elektrodou, elektronika měří protékající proud. Z výměníku jsou zbytkovým přetlakem z ventilátoru odváděny spaliny do komínu.

Dále je nutné zajistit odvod kondenzátu z výměníku. Kondenzát není nijak nebezpečný. Jde o vodu s pH od 2,8 do 5,5. O jeho množství nejvýznamněji rozhoduje teplota zpátečky a výkon kotle. O způsobu nakládání s kondenzátem rozhoduje vodohospodářský úřad. Pro kotelný bytových domů bývá potřeba zajistit neutralizaci kondenzátu před vypuštěním do kanalizace. Pro výkonově menší kotle v rodinných domech se neutralizace obvykle nevyžaduje a odvod kondenzátu je řešen pomocí odtokového potrubí volným výtokem do kanalizace přes kotlový sifon, který zamezuje průniku spalin do kanalizace. Volný výtok je požadován, protože kotel a kanalizace musí být tlakově odděleny, aby při tlakové diferenci nedošlo k odčerpání vodního sloupce sifonu a průniku spalin do kanalizace, nebo naopak k zaplavení kotle při vzduť kanalizace. Za volným výtokem, který nejčastěji reprezentuje kalich s kuličkou, navazuje další sifon, který zamezuje průniku zápachu z kanalizace.

Portem B [Obrázek 1] přichází do kotle vratná voda ze soustavy. Průtok je definován čerpadlem vytvořenou tlakovou diferencí a tlakovou ztrátou soustavy kotel-otopný systém. Čerpadlem hnaná voda vstupuje do výměníku, kde ochlazuje spaliny až

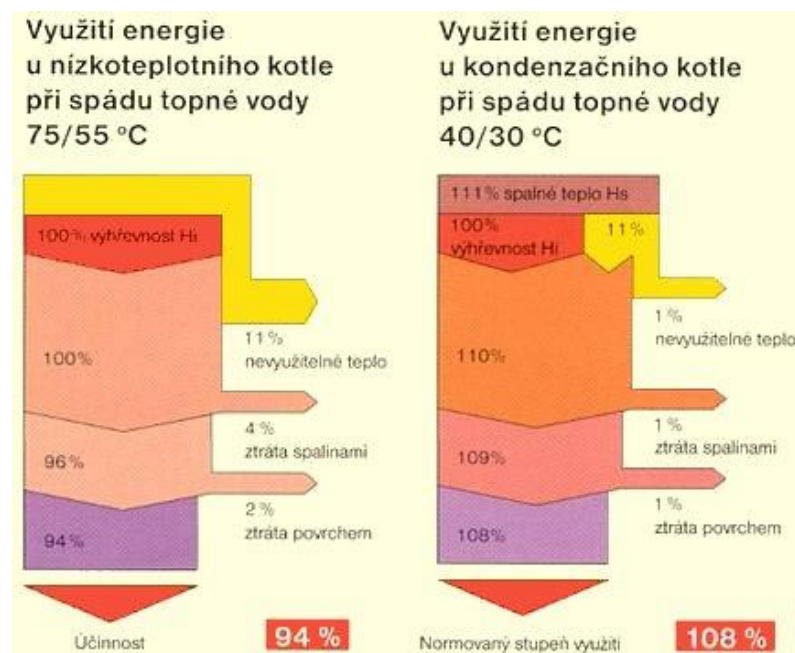


pod rosný bod vodní páry, která kondenzuje a uvolněné teplo zpátečku ohřívá. Následně ohřátá voda pokračuje na primární část výměníku, kde pojme hlavní část energie uvolněné spalováním plynu a ještě navýší svou teplotu na požadovanou. Tato horká voda je odváděna zpět do soustavy.

Z hlediska efektivity v porovnání s klasickým nízkoteplotním kotlem vypadá energetická bilance následovně. V problematice účinnosti kondenzačních kotlů vzniká jakási dvojakost vnímání termínu účinnost. Proto je nutné od sebe odlišovat dva termíny. Spalné teplo a výhřevnost. Platí,

$$\text{Spalné teplo} = \text{Výhřevnost} + \text{Teplo ve spalinách}$$

Pokud se podaří snížit teplotu spalin na 25 °C a získat z nich tak všechno latentní teplo, hovoří se pak o tzv. úplné kondenzaci. Vzniká tedy nejasnost, jakou hodnotu použít při určování 100 % příkonu energie. Dříve se u kotlů udávala výhřevnost a s nástupem kondenzačních jednotek se najednou udávala jejich „účinnost“ nad 100%. Tato fyzikální absurdita způsobila vznik Normovaného stupně využití (nebo také normovaný stupeň účinnosti [8]). Tuto problematiku zpřehledňuje následující obrázek.



Obrázek 2 - Využití energie u kondenzačního kotle [8]

Plynové kondenzační kotle jsou ideální do objektů s projektovanými tepelnými spády např. 40/30 °C nebo 55/45 °C, kde budou pracovat po většinu provozní doby v kondenzačním režimu. Jako nejvhodnější aplikace se tedy nabízí soustavy s podlahovým, stěnovým, či stropním vytápěním. Při projektování se musí brát ohled také

na odvod spalin, který není tak jednoduchý jako v ostatních případech. Kondenzační kotel má chladné spaliny (40 – 70 °C) a jejich odvod komínem se zajišťuje pomocí přetlaku, vytvářeným ventilátorem. Dále je nutné uvažovat i vznik kondenzátu, který se obvykle řeší odvodem do kanalizace.

### 2.3 Elektrokotel

Tento „bezemisní“ akční člen otopné soustavy se používá převážně v případech, kde není zajištěna stálá dodávka plynu. Jeho nespornou výhodou je nízká pořizovací cena a velmi snadné řízení. Starší jednotky se řídily pouze dvupolohově, tedy zapnout při deficitu teplé vody a vypnout při přebytku. Samozřejmě s pevně daným pásmem hystereze. Moderní elektrokotle pracují na principu modulace proudu za pomoci tyristorů nebo triaků. Proud ze sítě se přes bezpečnostní prvky dostává do triaků, kde se za pomoci vhodného algoritmu namoduluje na požadovanou hladinu a pustí do topných segmentů, které jsou uvnitř nádrže s otopnou vodou ze soustavy.

Velkou nevýhodou těchto jednotek je cena elektrické energie. S aktuálními cenami na trhu je vytápění pomocí elektrokotle jedna z nejdražších alternativ [3]. Dlouhodobě neefektivní vytápění jen těžko převáží nízká pořizovací cena. Jako vhodná aplikace se tedy nabízí chaty, nebo objekty s malou tepelnou ztrátou bez přístupu k plynu. Zajímavým poznatkem je srovnání energetických tříd elektrokotle a kondenzačního plynového kotle. Kondenzační jednotky se považují za kotle s nejvyšší účinností a spadají tak do třídy A, ale elektrokotle jsou, i přes skutečnost, že veškerá energie dodaná do kotle je přímo předávána na topné tyče, označeny třídou D [9]. Toto označení vyplývá z průměrné účinnosti elektráren v EU a ta je cca 36 % [10].

### 2.4 Kotel na tuhá paliva

Kotel na tuhá paliva je ve své podstatě svařenec z ocelových plechů a trubek, ve kterém probíhá přenos tepla, získaného z pálení tuhých paliv (např. uhlí, dřevo, pelety), přes stěny spalovací komory a stěny výměníku k vodě cirkulující v otopné soustavě [11]. Nevýhodou starých kotlů je neustálá pohotovost obsluhy, kdy obslužný personál musí v pravidelných časových intervalech přikládat a zajistit tak neustálý přísun paliva. Novější jednotky už jsou vybaveny zásobníky a ty nejmodernější dokonce rozhodovací logikou, která ve spolupráci s akčními členy ve formě ventilátorů dokáže udržet teplotu vody v otopné soustavě na požadované hladině.

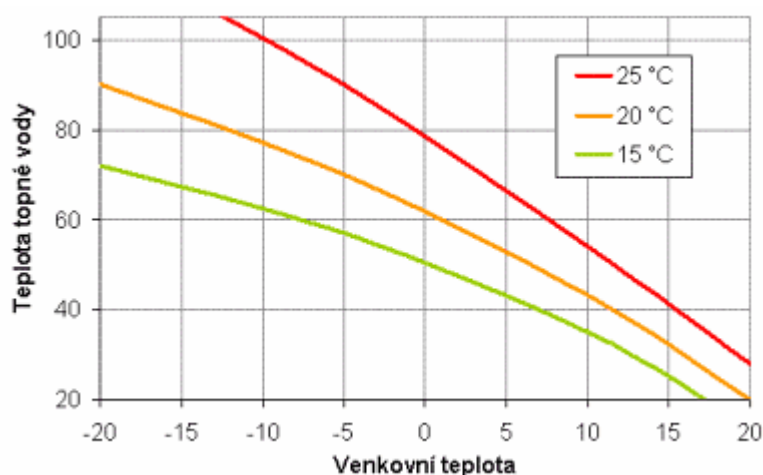
### 3 Regulace tepelných zdrojů v kaskádě

Možností jakými lze řídit teplotu v objektu popř. v jednotlivých místnostech je mnoho [12]. např. nejjednodušším způsobem je snížení průtoku otopné vody radiátorem jednoduchým otočením jeho ventilu. Další variantou je centrální řízení ventilů radiátorů nebo modulace výkonu čerpadla, což umožní ovládání na dálku. Tato práce se ovšem těmito problematikami nezabývá. Skutečnou úlohou je řízení samotného zdroje tepla, tak aby reagoval na aktuální stav soustavy a aby vyhověl požadavkům na případnou změnu žádané teploty vzduchu. Obecné požadavky na řízení kaskády [13]

- Minimalizovat počet startů (zamezení častému spínání)
- Prodloužení doby chodu hořáků (snížení emisního zatížení při startech hořáků)
- Spínat hořáky pouze tehdy, je-li to skutečně potřebné.

#### 3.1 Podle venkovní teploty

Regulace podle venkovní teploty nebo tzv. ekvitermní řízení je založeno na rovnováze mezi dodávaným teplem a tepelnými ztrátami místností, aby teplota v místnosti zůstala konstantní. Hledání vhodné teploty vody vykonává ekvitermní regulátor, který má ve své paměti uložené ekvitermní křivky a uživatel jen volí, která ze křivek vyhovuje jeho situaci. Ekvitermní křivky jsou empiricky získané závislosti teploty topné vody na venkovní teplotě při požadované teplotě v místnosti. [13]



Obrázek 3 - Ekvitermní křivky - příklad [14]

### 3.2 Podle teploty kotlové vody

Regulace podle teploty kotlové vody je nejjednodušší způsob řízení kotle. Tento způsob zaručuje připnutí dalšího kotle v případě poklesu teploty vody hlavního kotle pod definovanou mez spínací difference. Spínací intervaly a difference zvětšují kmitání teploty a regulační obvod má i za použití časovačů tendenci oscilovat. Navíc zpoždění vytvořené časovačem prodlužuje pokles teploty vody, což může vyvolat nízkoteplotní korozi. Odpovědí na tyto problémy je digitální regulátor, který umožňuje do rozhodovací logiky zahrnout složitější výpočty. Pokud teplota kotlové vody protne spodní spínací úroveň, pak se začne vznikat odchylka násobit s dobou běhu. Tento výpočet představuje ekvivalent integrace. Pak lze nastavit mez, po jejíž překročení se připne další kotel, který se reguluje společně s hlavním kotlem. Naopak v situaci, kdy stoupá teplota vody v kotli a vypočtený integrál překročí danou mez, se kotel odpojí. [13]

### 3.3 Podle výstupní teploty vody

Získávání hodnot potřebné veličiny (teploty vody) se odehrává přímo v kotli. Není tedy potřeba připojovat vzdálená čidla. V případě kotlových kaskád se teplota vody získává za THR. Tento způsob řízení spolehlivě informuje o nedostatku tepla v soustavě a tedy o potřebě připojení dalších kotlů. Na druhou stranu však nedává žádnou informaci o možnosti odpojení kotle z kaskády.

Kaskády kotlů, které se vyznačují proporčním (P) chováním, způsobují zapínání a vypínání hořáků v úzké závislosti na teplotě vody. Zároveň absence integrační (I) složky způsobuje trvalou regulační odchylku. Kombinace těchto dvou faktorů způsobuje kolísání teploty vody. Pro řízení kotlů v kaskádě je tak tento přístup nevhodný. [13]

Nabízí se použití PI regulátoru. V ideálním případě lze výkon kotle řídit spojitě (případ elektrokotle a použití polovodičových relé). Kondenzační kotle lze modulovat v rozsahu od minima do maxima. Typický příklad je 24 kW kotel s modulačním poměrem 1/10 umožňuje snížit výkon až na desetinu výkonu nominálního (2,4 kW). Pokud je výkon kotle řízen nespojitě, tak PI regulátor s sebou přináší nevýhodu ve formě častého spínání hořáků, ale i s těmito vlastnostmi je možné udržet kolísání teploty topné vody v úzkém rozmezí. Nechtěné starty hořáků se obvykle odstraňují použitím časovačů, které určují minimální dobu chodu a minimální dobu neaktivity. [13]

Charakteristickým rysem je, že připojení dalšího kotle v pořadí se projeví téměř okamžitým nárůstem teploty na požadovanou hladinu a tím se v akumulární nádobě může vytvořit vyšší teplota, než žádá soustava a zkratem se teplá voda smíchá s vratnou vodou soustavy. Tím se zvýší teplota vratné vody a hrozí překročení maximální provozní teploty na výstupu z kotle. [13]

### 3.4 Podle teploty vratné vody

Teplota vratné vody (zpátečky) je přímým odkazem odevzdaného výkonu a díky tomu vyjadřuje informaci o aktuálním stavu soustavy. Díky zpátečce lze rozhodnout, zda je nutné připojit popř. odpojit kotel. Ruku v ruce s přesným rozhodováním o řízení kaskády vzniká zároveň jakási závislost mezi logikou řízení a topnou soustavou. Zprovožňování takto řízené kotlové kaskády vyžaduje zvýšenou pozornost na odladění. [13]

Stejně jako řízení podle výstupní teploty, tak i tento způsob může způsobovat taktování kotlů, jemuž se zamezuje užitím zmíněných časových prodlev. Čidlo teploty je při paralelním zapojení kotlů možné umístit před (proti proudu vody) jakýkoli kotel, nebo mezi kaskádu a směšovací armaturu. Takto zapojená soustava vyžaduje zvýšenou pozornost při hydraulickém dimenzování. Odlišné výkony a průtoky jednotlivých kotlů vytváří chyby v rozhodování o žádané teplotě topné vody atp. Obecně se tento způsob řízení pro odlišné kotle příliš nehodí. [13]

### 3.5 Podle zátěže

Regulace podle zátěže je princip řízení bez nutnosti připojování jakýchkoli čidel. Tento přístup je založený na vytvoření křivky, která bude popisovat potřebu dodání tepelné energie. Konkrétně vyjadřuje závislost požadované teploty na zátěži kotle. Vedlejší kotle jsou spínány nebo odepínány podle maximálního výkonu a podle spínacího poměru (doba běhu hořáku / doba celého cyklu). [13]

### 3.6 Podle rozdílu teplot přívodní vody a zpátečky

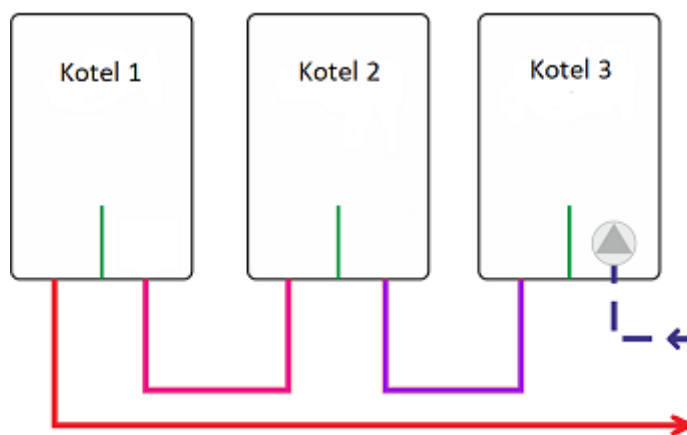
V praxi takováto regulace vypadá tak, že se do regulátoru nastaví požadovaný rozdíl teploty přívodní vody a zpátečky a jejich omezení. Pokud je tento rozdíl nula, neproudí do soustavy žádná topná voda a topný okruh se uzavírá skrze zkrat v akumulární nádobě. Tak lze vyhodnotit, že vytápění je možné vypnout. Na druhou stranu, v případě požadavku na dodávku tepla překračuje hodnota zmíněného rozdílu definovanou mez a tím se získá informace o možnosti zvýšení průtoku a zvýšení setpointu topné vody. [13]

## 4 Princip zapojení kotlů v kaskádě

Další otázkou, na kterou je žádoucí najít odpověď, je jakým způsobem je možné jednotlivé kotle v kaskádě zapojit. Nabízí se dvě základní varianty, podrobněji popsané v následujících odstavcích. Zapojení kotlové kaskády dále vyžaduje věnování pozornosti na tlakovou rovnováhu. Proto se používá v předchozí kapitole zmíněný termohydraulický rozdělovač. V následujících odstavcích je přehledně vysvětlený princip jeho činnosti.

### 4.1 Sériové zapojení

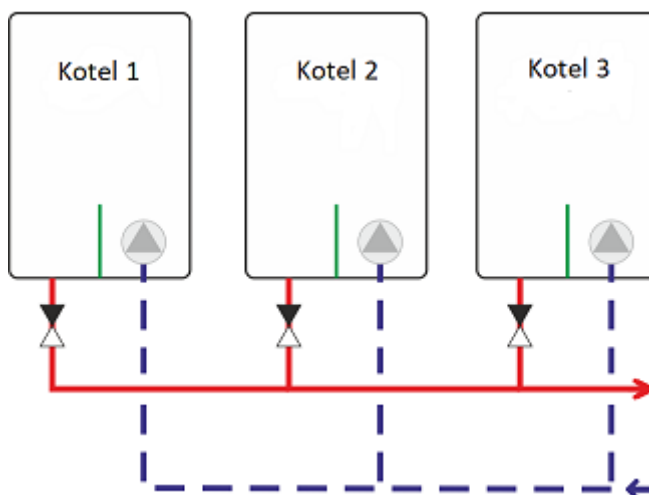
Tímto přístupem vzniká v topné soustavě variace v teplotách vratné vody pro jednotlivé kotle. Nejchladnější teplotu na vstupu má první kotel v sérii. Ten vodu ohřeje na požadovanou hladinu a jeho výstup ve formě ohřáté vody se stává vstupem následující jednotky. Tento způsob zapojení je pro kaskádu kondenzačních kotlů velmi nevhodný. Kondenzační jednotky potřebují pro efektivní provoz co možná nejnižší teplotu zpátečky, která ochlazuje spaliny kotle a zajišťuje kondenzaci. Efektivnějším způsobem, jak tento styl zapojení maximálně využít by mohlo být například na první pozici postavit zdroj tepla, který požaduje nízkou teplotu zpátečky na vstupu. Například zmíněný kondenzační kotel nebo tepelné čerpadlo. Takový zdroj tepla by byl následován konvenčním kotlem. Toto zapojení se obecně příliš nevyužívá.



Obrázek 4 - Sériové zapojení kotlů

## 4.2 Paralelní zapojení

Paralelní zapojení předchází stavům neefektivnosti soustavy. Zajišťuje stejnou teplotu vratné vody pro všechny dostupné jednotky a také maximální možné využití výkonu všech kotlů.

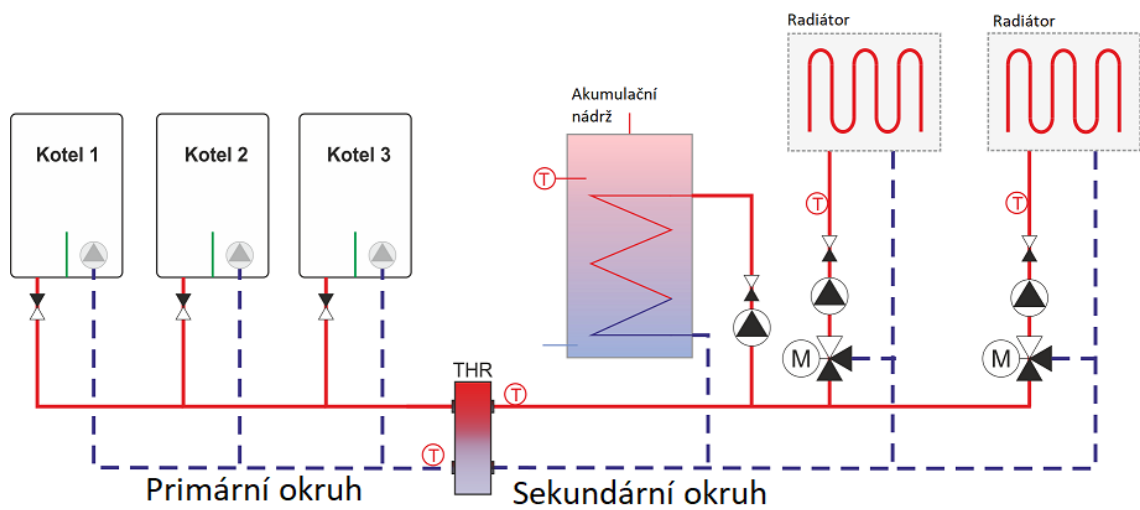


Obrázek 5 - Paralelní zapojení kotlů

Paralelní zapojení je jediná vhodná varianta při uvažování zapojování kaskády kondenzačních kotlů. Jak již bylo zmíněno výše, kondenzační kotle mají svou účinnost úzce spjatou s teplotou návratové vody a jen tento druh zapojení zajišťuje její nízkou hladinu pro všechny jednotky.

## 4.3 Termohydraulický rozdělovač

Zároveň se v soustavách často vyskytuje tzv. termohydraulický rozdělovač (THR). Tento předimenzovaný zkrat slouží k vyrovnávání průtoků primárním (kotlovým) a sekundárním (topným) okruhem. Princip jeho činnosti je vytvoření zkratu mezi horkou vodou a zpátečkou [15]. Tento zkrat se neprojeví, pokud je průtok primárním i sekundárním okruhem podobný. Může se ale stát, že se typicky v sekundárním okruhu průtok změní. Vznikne požadavek na zvýšení teploty formou otevření ventilu radiátoru. Průtok se tedy zvedne a tím vznikne nárok na THR jehož průtok kotlovým vstupem nebude postačovat. V nádrži se vytvoří proud od zpátečky soustavy na vstup do soustavy a sníží se jeho teplota.



Obrázek 6 - Princip zapojení topného systému s THR

Na snížení teploty v soustavě zareaguje řízení kotlů zvýšením setpointu teploty topné vody. Díky vyšší teplotě otopné vody se i po smíchání se zkratovou vodou dokáže udržet žádaná nátoková teplota do soustavy.



## 5 Měření vlastností kondenzačního kotle

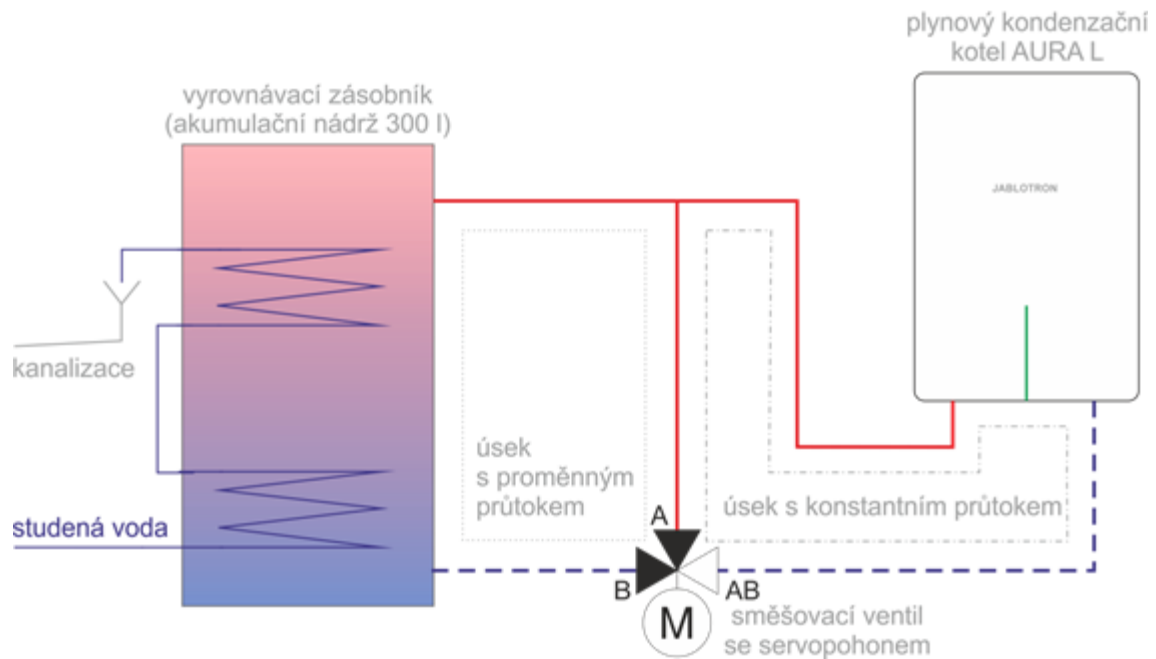
Jedním z řešených bodů práce bylo proměřit účinnost konkrétního kondenzačního kotle. Byl vybrán kotel AURA L společnosti Jablotron. Ve výkonovém rozsahu od 10 % do 100 % se zjišťovaly průběhy veličin jako teplota topné vody, účinnost, elektrický příkon, spotřeba plynu a teplota spalin. To všechno v závislosti na teplotě zpátečky. Cílem tohoto měření je objasnit účinnostní charakteristiku a získané znalosti aplikovat v návrhu algoritmu řízení kaskády kotlů. Přístroje použité při měření jsou:

- Kondenzační kotel Jablotron AURA L
- Analyzátor spalin Testo 320
- Wattmetr Rohde and Schwarz Hameg hm8115-2
- Plynoměr Itron Gallus G4
- Akumulační nádoba

Pro maximální přesnost měření bylo nutné navrhnout samotný experiment tak, aby bylo možné simulovat jak jednotlivé hladiny výkonů, tak i řídit teplotu zpátečky. Skutečným kamenem úrazu bylo získat v topném obvodu vodu o co možná nejnižší teplotě. Tato úloha byla vyřešena následovně.

Výstup kotle je rozdělen a připojen na port A třicestného ventilu a na horní vstup akumulární nádoby A. Tato nádoba má k dispozici dvě vnitřní spirály, které jsou hydraulicky odděleny od kotlového okruhu a primárně slouží k ohřevu vody. V tomto experimentu jsou tyto spirály zapojeny do série se vstupem vody z vodovodního řádu. Z toho tedy vyplývá, že místo k ohřevu slouží tyto elementy k chlazení. Zmíněnou metodou je teoreticky možné snížit teplotu v okruhu až na teplotu vody v řádu, ale se zapojeným kotlem a s velkým objemem akumulární nádoby lze pro celý rozsah výkonu simulovat vodu s nejnižší teplotou 20 °C.

Dolní výstup akumulární nádoby byl připojen na třicestný ventil, konkrétně na port B. Tento ventil slouží k regulaci teploty zpátečky. Teplota v akumulární nádobě byla udržována na takové teplotě, aby bylo možné pomocí ventilu směšovat výstupní vodu z kotle se zpátečkou akumulární nádoby na požadovanou teplotu zpátečky pro kotel. Díky tomu bylo možné měřit přes celý výkon kotle s různými teplotami zpátečky. Výstupní port AB směšovacího ventilu je trvale otevřen, jeho průtok se neměnil, bez ohledu na poměr otevření portů A a B.



Obrázek 7 - Hydraulické schéma měření

Průtok vody touto soustavou určuje kotlové čerpadlo integrované v jednotce a při 100% výkonu vytváří průtok  $1,3 \text{ m}^3/\text{h}$ . Průtok vody kotlem, potažmo soustavou, je velmi citlivá veličina a má přímý dopad na tepelný výkon, který je možné přenést při daném rozdílu teplot (konstrukce výměníku snese maximálně 20 K). Proto bylo při rozhodování o hodnotě průtoku přistoupeno k navození tzv. worst case scenario situace, tedy maximální možná hodnota. Z elektrického hlediska má čerpadlo s maximálním výkonem také maximální spotřebu. Z hlediska termodynamického je rychle proudící voda ve výměníku kotle vystavená zdroji tepla po kratší dobu a nestihne tedy přijmout tolik energie, kolik by dokázala pojmout s nižší rychlostí a spaliny z kotle odcházejí teplejší.

Dalším parametrem vstupujícím do experimentu je nastavení kotle. Respektive nastavení přebytku vzduchu  $\lambda$ . Každý kotel, který pracuje na principu spalování, potřebuje ke své činnosti přístup ke vzduchu. V případě spalování zemního plynu, ze stechiometrické rovnice spalování vyplývá konkrétní objem vzduchu potřebný ke spálení daného množství plynu. Ovšem tento objem je pouze teoretický. Skutečný objem musí být vyšší kvůli zapálení a následnému udržení plamenů [16]. Skutečný objem vzduchu, který je k dispozici kotli ke spalování je  $\lambda \cdot V_{\text{teor}}$ . V případě že by kotel byl nastaven na moc vysokou  $\lambda$ , tak se s klesajícím rosným bodem snižuje účinnost a kdyby byl nastaven na nízkou  $\lambda$  tak nemusí vyhořet všechno palivo a kromě ztráty energie se

zvýší i emise. Kondenzační kotle pracují v oblasti přebytku vzduchu v rozmezí 1,26 až 1,4. Pro toto měření je  $\lambda = 1,36$ .

Experiment proběhl za teploty 23 °C při zhruba stejném atmosférickém tlaku (měření ve dvou po sobě jdoucích dnech bez výkyvu počasí). Z hlediska této práce je možné tyto hodnoty zcela zanedbat, podmínky jsou uvedeny pouze pro doplnění. Samotné měření začíná zaregulováním žádané teploty zpátečky pomocí směšovacího ventilu. A nastavováním výkonu kotle od 10 %, 20 %.. 100 %.

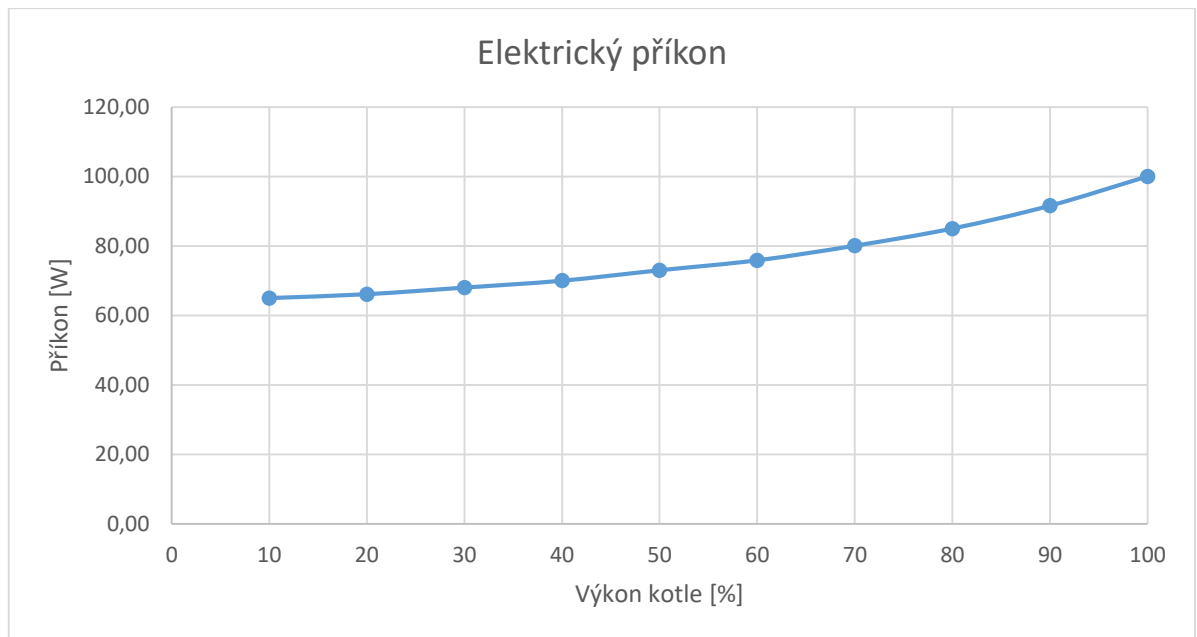
Poznatek z měření. Při nízkých výkonech se teplota spalin může lišit v závislosti na předchozím stavu kotle. Například, pokud je kotel neaktivní a přijde požadavek na topení o výkonu 10 % tak se teplota spalin (při teplotě zpátečky 30 °C) ustálila na 42 °C, ale pokud přijde požadavek na stejný výkon poté, co již byl kotel aktivní, tak se teplota spalin ustálila na 46 °C. Tuto vlastnost soustavy způsobuje setrvačnost tepelného výměníku, který je při nízkém výkonu (nižších otáčkách ventilátoru) méně větrán. Z toho je zřejmé, že přechody z jednoho stavu do druhého a naopak nejsou symetrické.

## 5.1 Příkon kotle

Experiment potvrdil, že wattmetrem změřený příkon není závislý na teplotě zpátečky. Díky tomu vzniklo 10 hladin elektrického příkonu v přímé závislosti na výkonu kotle.

Tabulka 1 - Příkon kotle

Tabulka el. příkonu [W]		Výkon kotle [%]									
		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Teplota zpátečky [°C]	20	65	66	68	70	73	76	80	85	91	100
	25	65	66,3	68,1	70	73	75	80	85	92	100
	30	65	66,5	68	70	73	76	80,4	85	92	100
	35	65	66	68	70	73	76	80	85	91,5	100
	40	65	66	68	70	73	76	80	85	91,5	100
	45	65	66	68	70	73	76	80	85	91	100
	50	65	66	68	70	73	76	80	85	92	100



Obrázek 8 - Příkon kotle - graf

Nalezená závislost odpovídá konstantnímu příkonu čerpadla a proměnnému výkonu ventilátoru. Z této závislosti vyplývá možnost minimalizace spotřeby elektrické energie kotlové kaskády. Zejména nelineární nárůst při vyšších výkonech, vede k hledání optimality. Pro úplnost měření bude vypočítána nejistota měření.

Analýza nejistot typu B není založena výhradně na statistických výpočtech, ale na údajích, uváděných výrobcí použitých měřicích přístrojů, popř. výsledcích kalibrací.

$$u_{Bi} = \frac{\Delta z_j}{\theta}$$

Kde  $\theta$  je hodnota ke zvolené aproximaci rozdělení pravděpodobnosti. Pro rovnoměrné rozdělení platí:  $\theta = \sqrt{3}$  a  $\Delta z_j$  je výpočet dílčí nejistoty jednoho zdroje a pro digitální přístroje se počítá:

$$\Delta z_j = a \cdot x_j + n \cdot d$$

Kde  $d$  označuje počet digitů (například pokud měřicí přístroj ukazuje hodnoty na jedno desetinné místo tak  $d = 0.1$ ).  $n$  je přesnost přístroje v digitech, z pravidla uváděná na štítku.  $x_j$  je naměřená hodnota a paramter  $a$  označuje přesnost přístroje (taktéž uváděná na štítku).

Po výpočtu nejistot typu B je nutné najít standardní kombinovanou nejistotu podle vzorce

$$u_c = \sqrt{\sum_i u_{Bi}^2}$$

A nakonec vypočíst rozšířenou nejistotu

$$U = k \cdot u_c$$

Vzorový výpočet nejistoty měření příkonu kondenzačního kotle pomocí měřicího přístroje Rohde and Schwarz Hameg hm8115-2 vypadá následovně. V první řadě je nutné zjistit vlastnosti měřicího přístroje v daném režimu.

Tabulka 2 - Přesnost wattmetru [17]

Active power measurement							
Ranges:	8 W	24 W	80 W	240 W	800 W	2400 W	8000 W
Resolution:	1 mW	10 mW	10 mW	100 mW	100 mW	1 W	1 W
Accuracy:	20 Hz – 1 kHz:		± (0.5 % + 10 digits)				
	DC:		± (0.5 % + 10 digits)				
Display:	4-digit, 7-segment LED						

Pro rozsah 240 W ve střídavé síti je hodnota rozlišení 0,1 W a přesnost 0,5 % + 10 digit. Ukázka výpočtu bude pro naměřenou hodnotu 65 W. Z těchto informací lze dosazovat do vzorce pro výpočet nejistoty.

$$\Delta z_j = a \cdot x_j + n \cdot d = \frac{0,5}{100} \cdot 65 + 10 \cdot 0,1 = 1,325 \text{ W}$$

$$u_{Bi} = \frac{\Delta z_j}{\theta} = \frac{1,325}{\sqrt{3}} = 0,7649 \text{ W}$$

Po nalezení všech hodnot  $u_{Bi}$  se přistupuje k výpočtu standardní kombinované nejistoty a rozšířené nejistoty.

$$U = k \cdot u_c = k \cdot \sqrt{\sum_i u_{Bi}^2} = 4,3905$$

Po zaokrouhlení se výsledná hodnota příkonu kondenzačního kotle o výkonu 10 % s jistotou nachází v rozmezí

$$P = (65,0 \pm 4,3) \text{ W}$$

## 5.2 Účinnost spalování

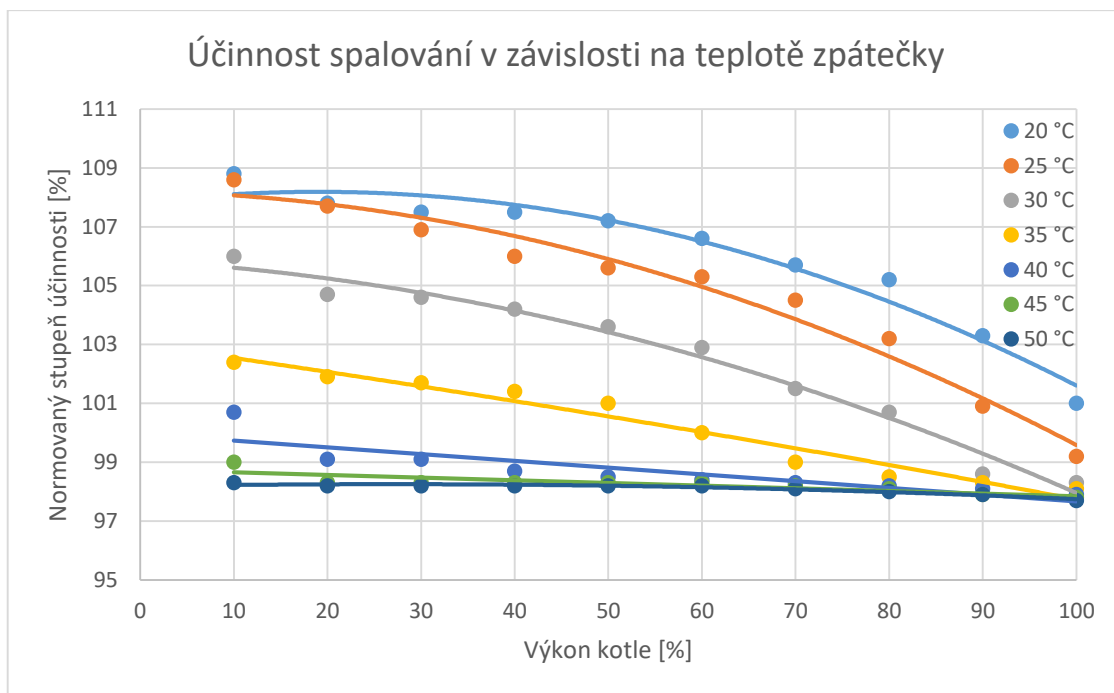
Dalším zajímavým bodem tohoto experimentu je zjistit, s jakou účinností dokáže vybraný kotel spalovat zemní plyn. Měření účinnosti kondenzačních kotlů je poměrně matoucí téma. Lze totiž narazit na data, která hovoří o účinnosti vyšší než 100 %. Proto je nutné mít na paměti, že takový údaj není skutečná účinnost, ale normovaný stupeň účinnosti. Důvod vzniku tohoto konfliktu vychází z historie, kde se uváděla klasická účinnost pro nekondenzační plynové kotle, které za svůj příkon považovaly výhřevnost zemního plynu. Nástup kondenzačních jednotek a zjištění, že je možné využít latentní teplo ve spalinách, umožnilo zvýšit efektivitu provozu. S touto získanou energií účinnostní křivka překročí tabuizovanou hranici 100 %. Lepším přístupem je tedy uvažovat jako referenci místo výhřevnosti paliva jeho spalné teplo. Tento parametr popisuje energii, kterou je schopné palivo předat spálením a ještě ochlazením spalin na teplotu 25 °C [18].

Naměřené hodnoty normovaného stupně účinnosti pomocí analyzátoru spalin Testo 320 jsou přehledně uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 3 - Normovaný stupeň účinnosti

Normovaný stupeň účinnosti [%]	Výkon kotle [%]										
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	
Teplota zpátečky [°C]	20	108,8	107,8	107,5	107,5	107,2	106,6	105,7	105,2	103,3	101
	25	108,6	107,7	106,9	106	105,6	105,3	104,5	103,2	100,9	99,2
	30	106	104,7	104,6	104,2	103,6	102,9	101,5	100,7	98,6	98,3
	35	102,4	101,9	101,7	101,4	101	100	99	98,5	98,3	98,1
	40	100,7	99,1	99,1	98,7	98,5	98,4	98,3	98,2	98,1	97,9
	45	99	98,3	98,3	98,3	98,3	98,3	98,2	98,1	97,9	97,8
	50	98,3	98,2	98,2	98,2	98,2	98,2	98,1	98	97,9	97,7

Z naměřených dat je evidentní potvrzení teorie o účinnosti kondenzačních kotlů. Měřením je dokázána vyšší efektivita v provozu kotle pro nižší výkonové stupně kotle a zároveň je dokázána vyšší efektivita pro nižší teploty zpátečky. Tato data se využijí pro návrh optimalizace provozu kaskády kotlů.



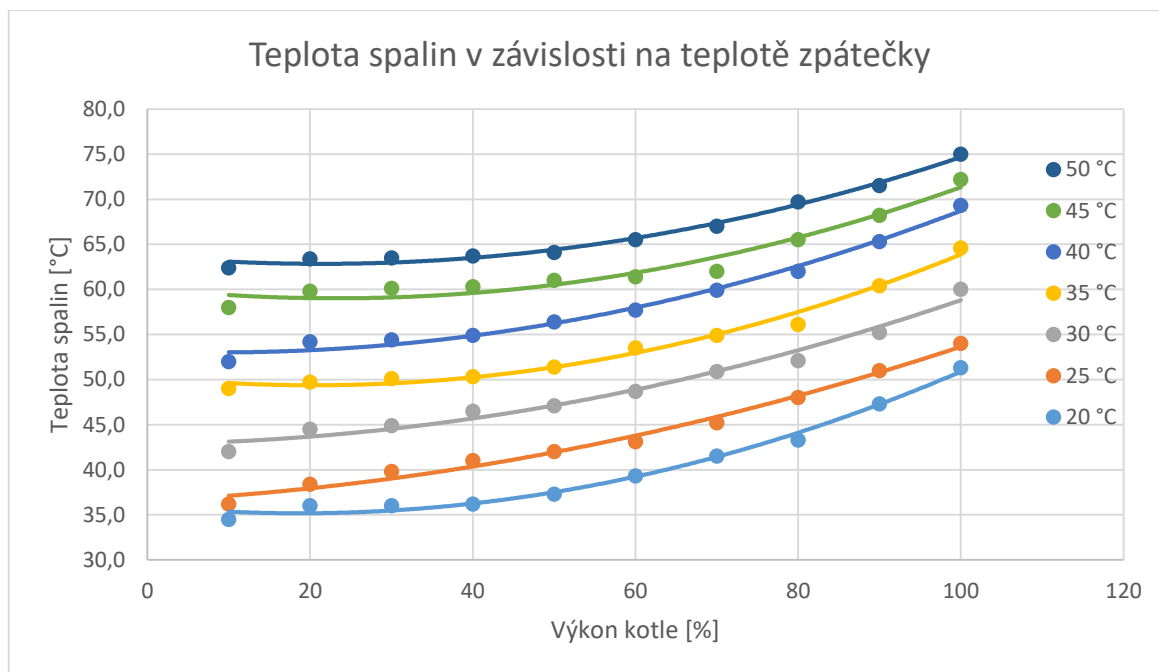
Obrázek 9 - Normovaný stupeň účinnosti - graf

### 5.3 Teplota spalin

Další veličinou, kterou Testo 320 měří je teplota spalin. Jedná se o nejzajímavější parametr z pohledu kondenzačních kotlů, protože rozhoduje, zda bude kondenzace probíhat, případně v jak velké míře. Jinými slovy určuje účinnost kotle a tím i zasahuje do nákladů na vytápění. Teplota spalin je hodnota přímo ovlivněná provozní teplotou topné vody a konstrukcí samotného kotle. Jako důkaz tohoto tvrzení poslouží následující měření.

Tabulka 4 - Teplota spalin

Teplota spalin [°C]	Výkon kotle [%]										
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	
Teplota zpátečky [°C]	20	34,5	36,0	36,0	36,2	37,3	39,3	41,5	43,3	47,3	51,3
	25	36,2	38,4	39,8	41,0	42,0	43,1	45,2	48,0	51,0	54,0
	30	42,0	44,5	44,9	46,5	47,1	48,7	50,9	52,1	55,2	60,0
	35	49,0	49,7	50,1	50,3	51,4	53,5	54,9	56,1	60,4	64,6
	40	52,0	54,2	54,4	54,9	56,4	57,7	59,9	62,0	65,3	69,3
	45	58,0	59,8	60,1	60,3	61,0	61,4	62,0	65,5	68,2	72,2
	50	62,4	63,4	63,5	63,7	64,1	65,5	67,0	69,7	71,5	75,0



Obrázek 10 - Teplota spalin - graf

Jak bylo možné předpovědět, tak z naměřených dat je evidentní závislost teploty spalin na teplotě vratné vody. Celý proces ochlazování spalin probíhá uvnitř kotlového výměníku, který musí být kvůli probíhající kondenzaci odolný vůči korozi. Tvar a objem výměníku jsou parametry, které ovlivňují množství předané energie mezi spalinami a okruhovou vodou. Pro každý kotol budou tyto hodnoty vycházet jinak, ale obecná závislost teploty spalin na teplotě vratné vody zůstane platná

Dalším parametrem, který má vazbu na předávání energie, je výkon kotle. Výkon kondenzačního kotle je řízen přes změnu otáček ventilátoru, který výslednou směs plynu a vzduchu dodává přetlakem na hořák. Proto se s vyšším průtokem plynu se vzduchem zvyšuje také průtok vzniklých spalin. Čím vyšší je průtok spalin výměníkem, tím hůře se spaliny ochlazují a své latentní teplo odnášejí komínem pryč. To je dáno neměnnou velikostí teplosměnných ploch výměníku. V neposlední řadě má na teplotu spalin vliv také průtok topné vody. Průtok vody je pro porovnání jednotlivých měření konstantní a z příčin uvedených na začátku kapitoly je nastaven výkon čerpadla na maximum.

Do kontextu k teplotě spalin je vhodné vkládat také rosný bod. Teplota rosného bodu vychází z entalpie spalin a určuje na jakou teplotu je nutné spaliny ochladit, aby proběhla kondenzace vodní páry ze spalin a bylo možné uvolnit latentní teplo. Teplotu rosného bodu určuje koeficient přebytku vzduchu  $\lambda$ . Například pro nastavený přebytek vzduchu  $\lambda=1,37$  vychází teplota rosného bodu 52 °C [19]. To ovšem neznamená, že když



bude mít teplota spalin 53 °C tak v tu chvíli kondenzace neprobíhá. Protože spaliny nejsou homogenní tak ani rozložení teploty není homogenní a kondenzace spalin bude probíhat převážně v oblastech blízkým k teplosměnným stěnám výměníku Kondenzace, však nikdy nemůže probíhat, pokud je teplota zpátečky vyšší, než teplota rosného bodu vodní páry ve spalinách při daném přebytku vzduchu. V tomto případě není energii kam předat.

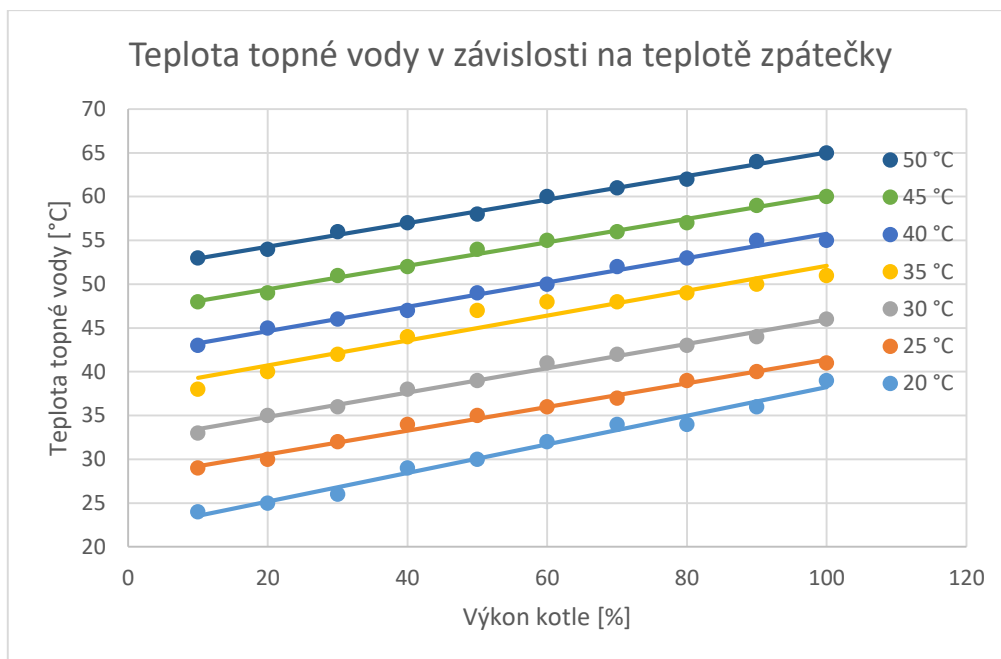
#### 5.4 Teplota topné vody

Měření teploty topné vody slouží primárně k určení rozdílu teplot, který dokáže kotel vytvořit. Zjišťuje se, na jakou teplotu lze ohřát vodu o definované teplotě a průtoku. Nalezené závislosti budou v následujících kapitolách sloužit k nastavení reálných parametrů modelu. Měření teploty vody zajišťuje interní obvod kotle a zaokrouhluje hodnoty na celé stupně Celsia. Vyčítání teplot a provozních stavů kotle bylo prováděno přes protokol OpenTherm®

OpenTherm® je komunikační protokol [20], který se užívá v topných systémech. Slouží ke komunikaci mezi ohřivačem a řídicím elementem. Jedná se o standard nezávislý, přenositelný napříč platformami různých výrobců. Komunikační master je vždy regulátor (např. prostorový přístroj) a komunikační slave je kotel. Komunikaci vyvolává Master, který rozhoduje, kdy má Slave pracovat. V nejjednodušším případě slouží k nastavování žádané hodnoty teploty vody, ale umožňuje předávat i komplexnější příkazy. Spojení probíhá po dvou vodičích. O certifikaci a správu protokolu se stará OpenTherm® Association [20].

Tabulka 5 - Teplota topné vody

Teplota topné vody [°C]	Výkon kotle [%]										
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	
Teplota zpátečky [°C]	20	24	25	26	29	30	32	34	34	36	39
	25	29	30	32	34	35	36	37	39	40	41
	30	33	35	36	38	39	41	42	43	44	46
	35	38	40	42	44	47	48	48	49	50	51
	40	43	45	46	47	49	50	52	53	55	55
	45	48	49	51	52	54	55	56	57	59	60
	50	53	54	56	57	58	60	61	62	64	65



Obrázek 11 - Teplota topné vody - graf

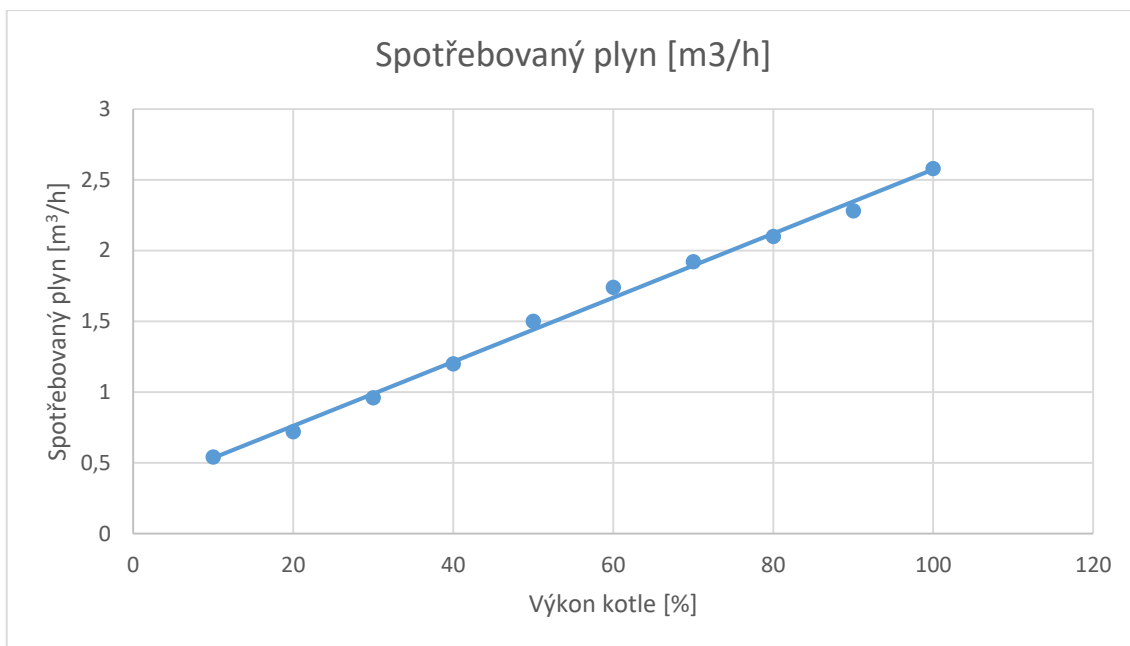
Obvyklým zvykem bývá nastavovat výkon kotle tak aby na výměníku nebyl teplotní rozdíl vyšší, než nejvyšší konstrukční. Překročení tohoto omezení může mít za následek narušení materiálu, zvýšení tzv. foul faktoru a tím snížení životnosti.

### 5.5 Spotřeba paliva

Zajímavým poznatkem z měření je hledání závislosti spotřeby paliva na požadovaném výkonu. V katalogu kondenzačního kotle Aura L jsou hodnoty minimální a maximální spotřeby při odpovídajících výkonech 0,5 m<sup>3</sup>/h a 2,4 m<sup>3</sup>/h. Z podstaty věci lze předpokládat, že spotřeba paliva není nijak závislá na teplotě zpátečky (pokud se kotli přímo vnutí výkonový stupeň). I přes tuto skutečnost proběhl odpočet spotřeby pro všechny teploty zpátečky, což zmíněný předpoklad potvrdilo. Dále se tedy bude uvádět pouze jedna hodnota spotřeby pro jednu výkonovou hladinu. Odpočet spotřebovaného plynu proběhl v horizontu minuty z plynoměru, který hodnotu spotřebovaného plynu uvádí v litrech. Následující hodnoty jsou přepočítány pro porovnání s očekávanými.

Tabulka 6 - Spotřeba plynu

Výkon kotle [%]	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Spotřebovaný plyn [m <sup>3</sup> /h]	0,54	0,72	0,96	1,2	1,5	1,74	1,92	2,1	2,28	2,58



Obrázek 12 - Spotřeba plyn - graf

Z nalezených hodnot je vidět, že přestože jsou naměřené hodnoty zatížené nepřesností, vyplývající z nepříliš snadného odečítání hodnot z plynoměru, se skutečně velmi blíží očekávaným hodnotám z katalogu. V grafu jsou patrné drobné nelinearity způsobené nelineární charakteristikou plynového ventilu, ale případnou linearizací nehrozí výrazná ztráta přesnosti.

## 6 Model kaskády

Navrhované řízení kaskády a jeho efektivita je potřeba ověřit. Nabízí se možnost vytvořit funkční model kaskády kotlů, který bude dostatečně přesně popisovat chování skutečné kaskády a s jeho pomocí bude možné získat potřebná data. Tento model vznikl v prostředí Matlab – Simulink. Matlab má ovšem ještě spoustu možností doplnění o pluginy, které rozšiřují jeho funkci. Jedním z těchto dodatečných softwarů je Simscape.

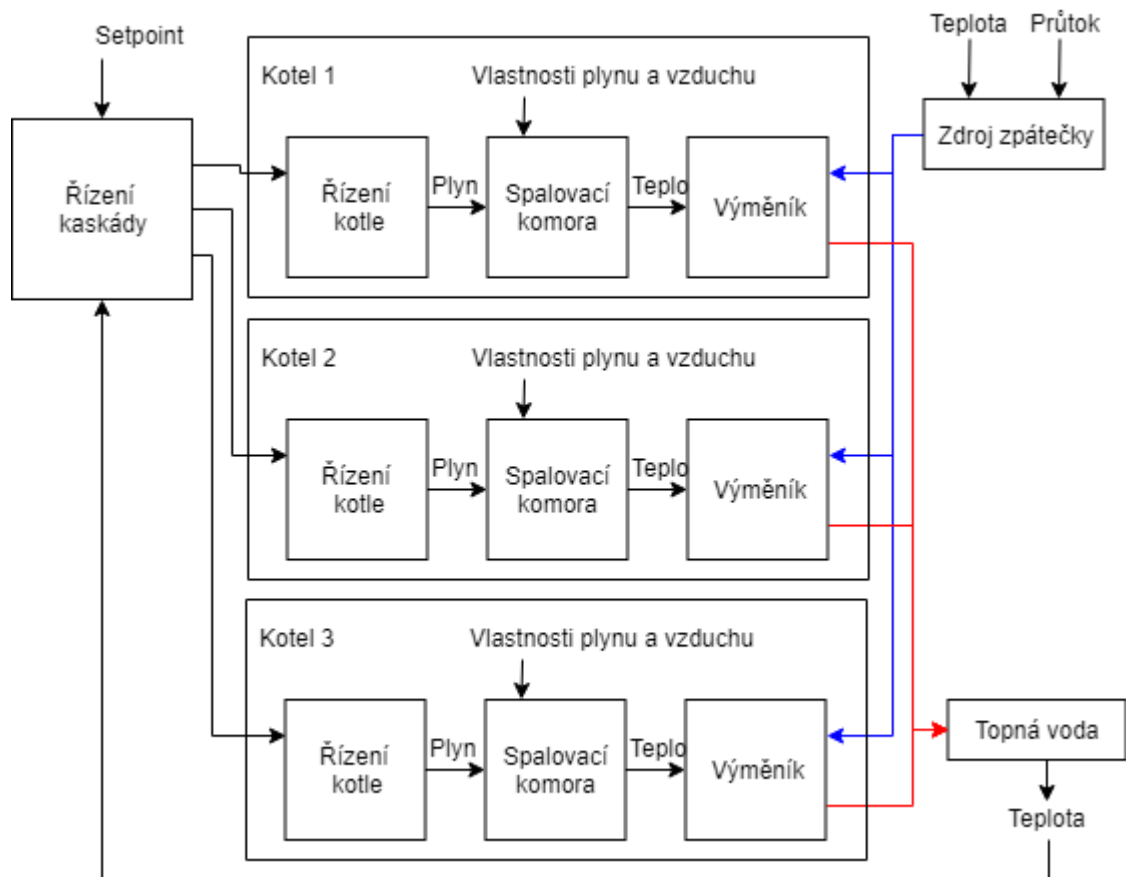
### 6.1 Vývojové prostředí Simscape

Simscape rozšiřuje pole působnosti Simulinku a nabízí nové nástroje pro modelování fyzikálních systémů. Přidáním Simscape se získá zcela nová knihovna prvků použitelných pro modelování reálných soustav. Jeho knihovna je rozdělená podle funkce obsažených prvků na: Mechanical, Hydraulic, Electrical, Thermal, Thermal Liquid, Pneumatic a Magnetic, z nichž každé oddělení je definováno svou vlastní barvou. Prvky v těchto odvětvích se dále dělí na: Senzory, Zdroje a Elementy. Spojení jednotlivých bloků v modelu znázorňují přenos energie v systému.

Největší přínos tohoto pluginu je, že každý prvek je svázán s jednou nebo více fyzikálními veličinami. Tím se v obvodu začnou objevovat reálné veličiny, které lze předat nebo měřit. Dále tento přístup umožňuje pracovat s popisem struktury skutečného zařízení bez nutnosti definice diferenciálních rovnic a dalších matematických vztahů s ním spjatých. V případech, kdy uživateli nestačí předdefinované knihovní bloky, je možné vytvořit vlastní nástroje za pomoci Simscape language, který vychází z programovacího jazyka Matlab.

### 6.2 Blokové schéma modelu

Základními stavebními bloky jsou spalovací komora, výměník, zdroj zpátečky, řízení kotle, řízení kaskády. V modelu byl původně pomocí bloků Simscape vytvořen ještě dům s definovanou tepelnou ztrátou, který bylo možné pomocí kaskády vytápět. Pro verzi s jedním kotlem tato varianta fungovala obstojně, ale s přidáváním dalších kotlů se čas výpočtu několikanásobně prodloužil, až jakékoli debugování probíhalo v horizontu hodin. Proto bylo od modelu místnosti upuštěno a místo toho je vytvořena „bezedná“ nádoba, které je možné vnutit teplotu a tlak. Z tohoto bloku proudí voda do výměníku a do další nádoby, ve které se měří její teplota. Mezi spalovací komorou a výměníkem se předávají signály o získaném teple a vlastnostech spalin. Do komory přichází informace o palivu a vzduchu z bloku řízení kotle.



Obrázek 13 - Blokové schéma modelu

Pro jednotlivé úlohy bylo nutné model přizpůsobovat, ale základní myšlenka řízení vychází z výše uvedeného schématu.

### 6.3 Spalovací komora

Simscape umožnil vznik bloku, který reprezentuje spalovací komoru skutečného kotle. Simuluje spalování jako úplnou oxidaci uhlovodíkového paliva. V tomto případě metanu. V následujícím postupu budou využívány názvy proměnných tak, jak byly definovány v kódu bloku furnace a to z důvodu lepší orientace a větší přehlednosti. Veličiny, které jsou užity vícrát (hmotnostní průtok, měrná tepelná kapacita, atd.) a jejich obvyklé označení by se vyskytovalo duplicitně, by způsobovaly nepřehledné zápisy. Spalovací komora je v modelu nazvána furnace (česky - pec) a disponuje následujícími vstupy a výstupy.

Vstupy:

$\dot{m}_{fuel}$  [kg/s] - Hmotnostní průtok paliva

$T_{fuel}$  [K] - Teplota paliva

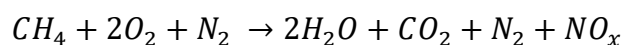
Humid_ratio [-]	- Vlhkost vzduchu
T_air [K]	- Teplota vzduchu
LHV [J/kg]	- Spalné teplo paliva

(Pozn. LHV značí z Anglického jazyka Lower heating value, což je veličina která se do češtiny překládá jako výhřevnost. Vzhledem k faktu, že model odpovídá kondenzační jednotce, pohybuje se tato hodnota mezi výhřevností a spalným teplem zemního plynu v závislosti na teplotě zpátečky - Podrobněji v kapitole [6.4 Příprava paliva])

Výstupy:

H.T [K]	- Teplota spalin
H.Q [kg/s]	- Hmotnostní průtok spalin
C_exh [J/s·K]	- Tepelná kapacita spalin

Prvním krokem výpočtu je nalezení objemu vzduchu, potřebného pro úplné spálení paliva. Tento výpočet vychází ze stechiometrické rovnice pro spalování:



Složení vzduchu se uvažuje O<sub>2</sub>~21 % a N<sub>2</sub>~79%

Pro reálné palivo je molární poměr vodíku a uhlíku  $n = 3,95$ . S touto informací je možné zjistit Stechiometrický poměr paliva a suchého vzduchu z rovnice

$$fuel\_air_{sto} = \frac{(12 + n)}{137.28 * \left(1 + \frac{n}{4}\right)} \quad [-]$$

Skutečný spotřebovaný vzduch je:

$$fuel\_air_{act} = \lambda \cdot fuel\_air_{sto} \quad [-]$$

$$mdot\_air\_su = mdot\_fuel / fuel\_air\_act \quad [kg/s]$$

Kde  $\lambda$  označuje přebytek vzduchu pro udržení plamene. Dalším krokem je nalezení termálních vlastností spalného vlhkého vzduchu. Měrná tepelná kapacita vlhkého vzduchu se zjistí výpočtem z měrné tepelné kapacity suchého vzduchu ( $cp\_air = 1005 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ ) a přidáním měrné tepelné kapacity vodní páry.

$$cp\_su = cp\_air + Humid\_ratio \cdot cp\_vapor \quad [J/kgK]$$

Měrná tepelná kapacita zemního plynu se do modelu zadává jako konstantní parametr.  $C_{p\_fuel} = 1880 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ . Se znalostí hmotnostního průtoku paliva i vzduchu je možné dopočítat tepelnou kapacitu obou dodávaných plynů.

$$C_{air} = \dot{m}_{air\_su} \cdot c_{p\_su} \quad [\text{J/K}]$$

$$C_{fuel} = \dot{m}_{fuel} \cdot c_{p\_fuel} \quad [\text{J/K}]$$

Energie, která vstupuje do kotle, není uložena pouze v plynu a jeho spalném teple, ale také v teplotě samotného plynu a okolního vzduchu. Byť se nejedná o výrazný energetický příspěvek, je nutné ho mezi vstupy zahrnout. Teplota směsi paliva se vzduchem je tedy:

$$T_{mix} = \frac{(C_{air} \cdot T_{air} + C_{fuel} \cdot T_{fuel})}{(C_{air} + C_{fuel})} \quad [\text{K}]$$

Na blok furnace navazuje tepelný výměník. Tento prvek potřebuje znát vlastnosti tekutin, které si mají mezi sebou vyměňovat energii. Proto je potřeba zjistit jakou tepelnou kapacitu budou mít vzniklé spaliny. Měrná tepelná kapacita je z velké části závislá na obsahu vodní páry. Obsah vodní páry ve spalinách je ze stechiometrické rovnice definován:

$$\dot{m}_{water\_gen} = (n/2) \cdot (18/(12 + n)) \cdot \dot{m}_{fuel} \quad [\text{kg/s}]$$

Tak je zjištěna hodnota průtoku vodní páry získané spalováním zemního plynu. Dalším zdrojem vodní páry ve spalinách je vodní pára, obsažená v dodaném vzduchu. Výsledná hodnota průtoku je tedy:

$$\dot{m}_{water\_exh} = \dot{m}_{air\_su} \cdot Humid\_ratio + \dot{m}_{water\_gen} \quad [\text{kg/s}]$$

Pro výpočet relativní vlhkosti spalin už je znám hmotnostní průtok vodní páry, ale hmotnostní průtok suchého vzduchu zatím ne. Protože hodnotu hledaného průtoku budeme znát až v příští iteraci, tak v tuto chvíli přichází nutnost definování počátečních podmínek. V prvním výpočetním vzorku je tedy hodnota hmotnostního průtoku suchého vzduchu:

$$\dot{m}_{air\_exh} = 1 \quad [\text{kg/s}]$$

V každém dalším kroku se hmotnostního průtoku suchého vzduchu vypočítá:

$$\dot{m}_{air\_exh} = \dot{m}_{mix} - \dot{m}_{water\_exh} \quad [\text{kg/s}]$$

Nyní jsou známy všechny parametry potřebné k nalezení tepelné kapacity spalin a stačí je dát správně dohromady. Relativní vlhkost spalin definovaná

$$HR_{exh} = \frac{\dot{m}_{water\_exh}}{\dot{m}_{air\_exh}} \quad [-]$$

je použita pro výpočet měrné tepelné kapacity spalin.

$$cp_{air\_exh} = cp_{air} + HR_{exh} \cdot cp_{vapor} \quad [J/kgK]$$

A konečně se znalostí hmotnostního průtoku spalin je nalezena tepelná kapacita spalin.

$$C_{exh} = \dot{m}_{air\_exh} \cdot cp_{air\_exh} \quad [J/K]$$

$C_{exh}$  je jedna ze tří veličin, které je nezbytně nutné získat z tohoto bloku. Popisuje tepelnou kapacitu média vstupujícího do výměníku a tím přímo výměníku předá informaci, jak ochotně proudící médium dává, přijímá a sdílí tepelnou energii. Dalšími výstupy, které je nezbytně nutné získat, jsou samotná energie získaná spálením dodaného paliva a hmotnostní průtok spalin.

O hmotnostním průtoku spalin už padla zmínka v předchozích odstavcích, ale nikde nebylo explicitně řečeno následující: hmotnostní průtok spalin přímo odpovídá hmotnostnímu průtoku dodávané směsi paliva se vzduchem. Toto tvrzení vychází ze zákona zachování hmotnosti a také z kapitoly [2.2] popisující funkci plynového kotle, kde se přímo hovoří o ventilátoru a hodnotě otáček ovlivňující jak průtok spalin, tak otevření ventilu řídicího přísunu zemního plynu. A tedy:

$$H.Q = \dot{m}_{mix} \quad [kg/s]$$

A nakonec to nejpodstatnější. Teplo získané z dodaného paliva. V principu jde o přímočarý výpočet. Známý je hmotnostní průtok paliva i hmotnostní průtok vzduchu, ale ten ze své podstaty nemá na získanou energii vliv a pouze zajišťuje stálost procesu hoření. Dále je známé spalné teplo paliva, které přímo říká, kolik energie je možné získat dokonalým spálením kilogramu paliva a ochlazením spalin na 25 °C. S tímto účelem vznikla následující rovnice popisující časově závislý energetický zisk.

$$Q_{fuel} = \dot{m}_{fuel\_sat} \cdot LHV \quad [J/s]$$



Když je známa tepelná kapacita spalin i energie, získaná ze spálení plynu je možné získat teplotu spalin na výstupu v čase. K původní teplotě směsi zemního plynu se vzduchem je přidávána energie následovně:

$$H.T = T_{mix} + \frac{Q_{fuel}}{C_{exh}} [K]$$

Tím se získal poslední parametr potřebný k popsání spalovací komory, nacházející se uvnitř plynového kotle. Simscape umožňuje svázat hmotnostní průtok spalin a jejich teplotu do jednoho signálu  $H$ . V tomto bloku zároveň není problém najít jakoukoli vnitřní veličinu nebo signál a její hodnotu si vyvést na výstup pro vytvoření grafů nebo pro další výpočty. Veličinou, kterou je důležité pro další výpočty zachovat je hlavně hmotnostní průtok spalin. Od této hodnoty se v reálu odvíjí účinnost kotle prostřednictvím instalovaného výměníku.

#### 6.4 Příprava paliva

Nyní má kotel informaci, zda je žádoucí v daný okamžik topit, nebo ne. Další informací, kterou je potřeba poskytnout, je průtok paliva. Vzhledem ke skutečnosti, že se pracuje pouze s modelem kotle, je teoreticky možné poslat na vstup kotle jakékoli množství plynu a kotel bez sebemenších obtíží zareaguje jeho spálením na základě rovnic z kapitoly [6.3 Spalovací komora]. Je tedy potřeba modelu vnutit parametry paliva tak, aby odpovídal reálnému zařízení.

Průtok plynu má 3 hlavní hladiny. První hladinou je 0 kg/s, což odpovídá neaktivnímu kotli. Další hladinou je minimální průtok paliva, který odpovídá minimálnímu výkonu kotle. Při průtoku nižším, než minimálním kotel nedokáže udržet plamen a z bezpečnostních důvodů uzavírá plynový ventil. Třetí hladinou je maximální hodnota průtoku paliva a tedy maximální výkon kotle. Pro nalezení popsanych parametrů bylo potřeba zvolit konkrétní plynový kondenzační kotel, ze kterého bude vytvářený model vycházet. Výchozím kondenzačním kotlem byl zvolen kotel Jablotron AURA L, který byl k dispozici už k měření, takže jeho vlastnosti jsou známé a popsané v kapitole [5 Měření vlastností kondenzačního kotle]

V katalogu technických údajů kotle Jablotron AURA L se uvádí, že minimální spotřeba plynu v provozu je 0,5 m<sup>3</sup>/h. Dodávkou tohoto množství plynu lze získat 4 kW výkonu kotle při teplotním spádu 50/30 °C. Maximální spotřeba plynu uvedená v katalogu při jmenovitém výkonu 24 kW a při stejném teplotním spádu je 2,4 m<sup>3</sup>/h.

Jednou velmi výhodnou vlastností, kterou zvolený kotel disponuje, je možnost modulace výkonu. Tento moderní typ kotlů umožňuje téměř spojitě přecházet mezi výkonovými hladinami. Modulací hořáku je možné předcházet kmitání teploty vody a také snížit počty startů, což jsou typické neduhy jedno nebo dvoustupňových hořáků.

Další výhodou je ověření katalogových hodnot. V předchozím odstavci jsou vypsané některé parametry kotle vyčtené z katalogu produktu, ale díky měření, které proběhlo v kapitole 5, je možné potvrdit, že tyto hodnoty skutečně odpovídají reálnému zařízení a lze je už ověřené vnést do modelu. Po přepočítání z objemového toku na hmotnostní tok.

Rozsah průtoku plynu = <0,5 ; 2,4> [m<sup>3</sup>/h], Uvažovaná hustota plynu = 0,7 [kg/m<sup>3</sup>] [21]

Ukázka výpočtu převodu horní hranice:

$$Mdot \left[ \frac{kg}{s} \right] = \frac{Vdot \left[ \frac{m^3}{h} \right]}{3600} \cdot \rho \left[ \frac{kg}{m^3} \right] = \frac{2,4}{3600} \cdot 0,7 = 0,0004666 \left[ \frac{kg}{s} \right]$$

Protože zvolený kotel disponuje hořákem o modulačním poměru 1:5 je stanoven minimální průtok plynu jako pětina průtoku maximálního. Touto logikou jsou pomocí bloku saturation zadány následující limity.

Horní mez saturace = 0.0004666

Dolní mez saturace = 0.00004666

A pro simulování bezpečnostního zavření ventilu při průtoku nižším než minimálním je vytvořena jednoduchá funkce nulování průtoku.

Další vlastností, kterou spalovací komora musí znát je energie získatelná spálením plynu a ochlazením spalin. Tato hodnota by ve své podstatě měla zůstat konstantní, ale v modelu je využita pro přenos informace o probíhající kondenzaci. Ze závislosti teploty spalin na zpátečce naměřené na skutečném kotli je vypočtena funkce, která na základě teploty rosného bodu pra danou  $\lambda$  rozhoduje, v jaké míře probíhá kondenzace. Tato míra se projeví korekcí energie, kterou je možno získat a pohybuje mezi hodnotami.

Min = 41,1 · 10<sup>6</sup> [J/kg] – Výhřevnost (bez kondenzace)

Max = 52,2 · 10<sup>6</sup> [J/kg] – Spalné teplo (úplná kondenzace)

## 6.5 Řízení kaskády

Pro řízení kaskády kotlů je potřeba vytvořit blok, který bude na základě stavu soustavy rozhodovat o nastavení jednotlivých kotlů. V praxi je zvykem tuto rozhodovací logiku stavět na tzv. integračním kritériu. Integrační kritérium je založeno na výpočtu integrálu regulační odchylky teploty topné vody. Ve spojité oblasti výpočet hodnoty integrace vypadá takto:

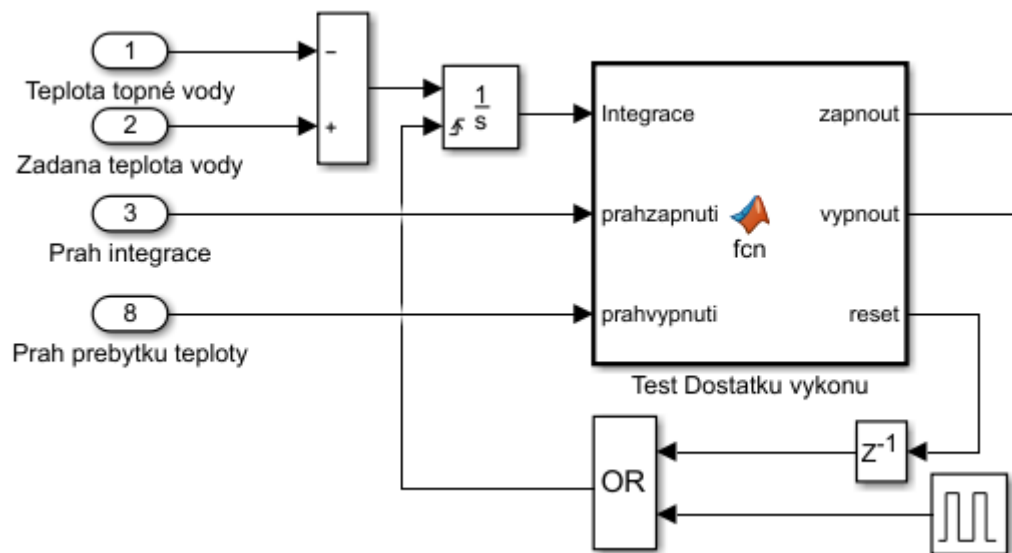
$$H = \int e(t)dt = \int T(t) - w(t) dt \quad [K \cdot s]$$

$T(t)$  – teplota topné vody

$w(t)$  – žádaná teplota topné vody

Hodnota  $H$  má fyzikální rozměr Kelvinsekundy a lze od ní odvozovat nastavitelné prahy připínání nebo odepínání kotlů. Zjednodušeně řečeno lze tuto veličinu chápat jako nedostatek (popř. přebytek) tepla po definovanou dobu. Nastavením prahu např.  $prah = -3600$  se vyjádří omezení, že je možné tolerovat regulační odchylku  $-1$  K po  $3600$ s, tedy teplotu o jeden stupeň nižší než žádanou po jednu hodinu atp. Pokud by se  $H$  hodnota prahu překročila (tj.  $H < -3600$ ), pak je zřejmé, že je nutné posílit topný výkon kaskády a tedy připnout další kotel v pořadí.

Tato logika je ještě posílena resetem integrace při překročení prahu a také periodickým resetem. Periodický reset v definovaných okamžicích vynuluje aktuální hodnotu  $H$  a tím zajistí, že integrační charakter prvku se nebude držet na nenulové hodnotě v případě, kdy je regulační odchylka již odstraněna. Zároveň se tím eliminují nepotřebné starty hořáků a snižuje se doba chodu hořáků. Při volbě prahů a periody resetu je nutné mít na paměti, že tyto hodnoty jsou svým způsobem svázané. Při zkrácení periody resetu je potřeba větší regulační odchylka pro dosažení prahu a opačně, při prodloužení periody může i dlouhotrvající minimální regulační odchylka vyvolat připnutí (odepnutí) kotle.



Obrázek 14 - Schéma integračního kritéria

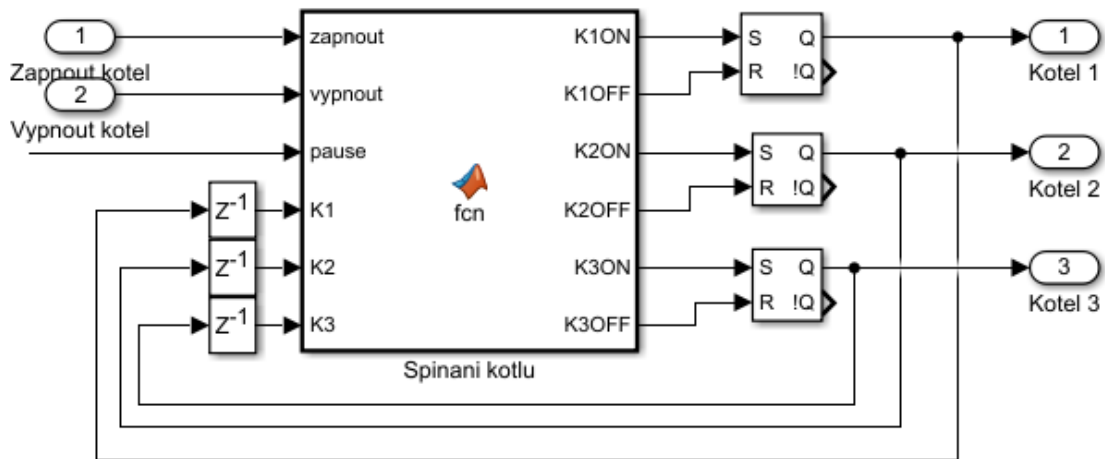
Jak již bylo naznačeno, tak jeden integrál rozhoduje o připojení i odpojení kotlů. Z tohoto tvrzení vyplývá, že je potřeba určit dva odpovídající prahy. Jeden bude kladný a druhý záporný. V zásadě prahy nemusí být symetrické. Kladný práh, který definuje nadbytek teplé vody, by měl být ideálně nulový, protože nikdo nechce platit za teplo, které není potřeba (reálné zařízení však má své interní hysterezní pásmo kolem setpointu teploty topné vody). A na druhou stranu záporný práh by měl být nastavený tak, aby se minimalizovaly počty startů, potažmo doby chodu hořáků a zároveň se dosáhlo žádané teploty na vstupu do soustavy v konečném čase.

## 6.6 Řízení kotlů

Výše popsany postup se nazývá kaskádní řízení a v kontextu struktury řízení kotlů se jedná o nadřazený blok, který má dva výstupy. Tyto výstupy jsou zapnout a vypnout. Informace, kterou tyto signály nesou, jsou předávány bloku s názvem Spouštění kotlů, který obsahuje informace o stavu každého jednoho kotle. V tomto bloku se rozhoduje, který konkrétní kotel skutečně zareaguje na požadavky kladené prostřednictvím nadřazeného bloku. Ve vytvořeném Simulinkovém modelu, který má tři kotle v kaskádě je 6 ON-OFF výstupů. Na tyto výstupy navazují RS klopné obvody (např. Kotel1ON je svázaný se vstupem Set a Kotel1OFF se vstupem Reset). Takto využitý RS klopný obvod se chová jako paměť a s jeho pomocí se posílá do každého kotle bitová informace.

1 – Spustit / Nevypínat kotel

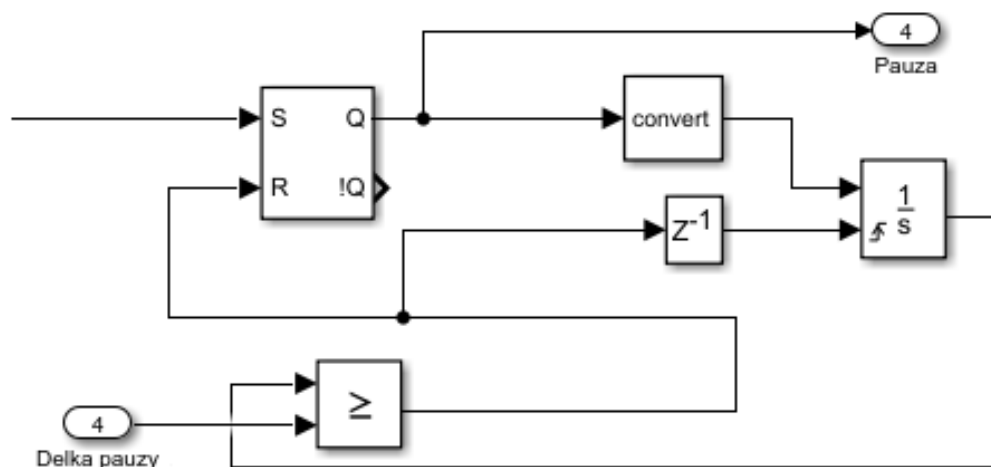
0 – Vypnout / Nezapínat kotel



Obrázek 15 - Schéma vyhodnocování požadavků na kotle

Dalším velmi důležitým bodem řízení, na který musí být brán zřetel, je cyklování kotlů. Může totiž nastat situace, že odepnutí jednoho kotle způsobí podkmit teploty vody pod setpoint a tím vyvolat požadavek na připnutí právě odpojeného kotle. Pro odstranění této vlastnosti se v praxi používají časovače. Konkrétně po odpojení kotle se spustí časovač, který po určitou dobu zamezí provádění dalších požadavků na zapnutí nebo vypnutí. Jelikož Simulink nenabízí jednoduchý způsob aplikace časovačů, byla vytvořena pomocí známých bloků alternativní verze.

Generování pauzy zajišťuje jakákoli změna na výstupech Kotel 1, Kotel 2, nebo Kotel 3. Tuto funkčnost zajišťují bloky Detect change a logický OR. Výstup bloku OR je bitový signál nesoucí informaci o právě provedené změně a právě tento signál je přiveden na vstup následujícího obvodu.

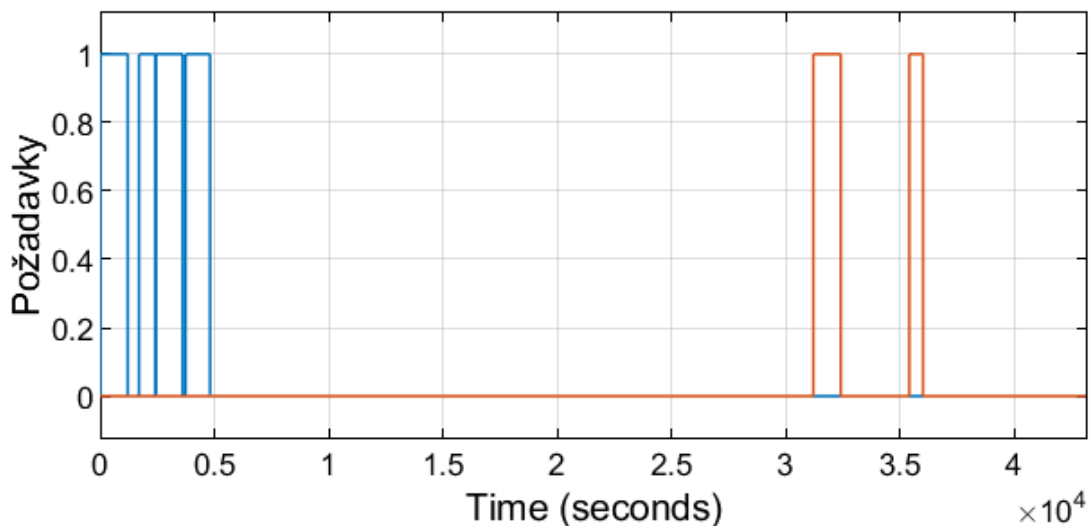


Obrázek 16 - Generování pauzy

Výstup Pauza je true pokud právě proběhla změna. Tento impuls spustí integrační smyčku, ve které se načítají hodnoty po jedné až do dosažení konstanty Délka pauzy. Po překročení této hladiny se integrátor i RS klopný obvod resetují a tím nastaví hodnotu Pauza na false a tím umožní řízení zasahovat do zapínání a vypínání kotlů. Ze schématu je patrné, že se v modelu nastavuje pouze jedna hodnota délky pauzy. V praxi může řešení vypadat i tak, že po zapnutí kotle následuje jinak dlouhá pauza než po vypnutí. Toto nastavení závisí na konkrétní aplikaci.

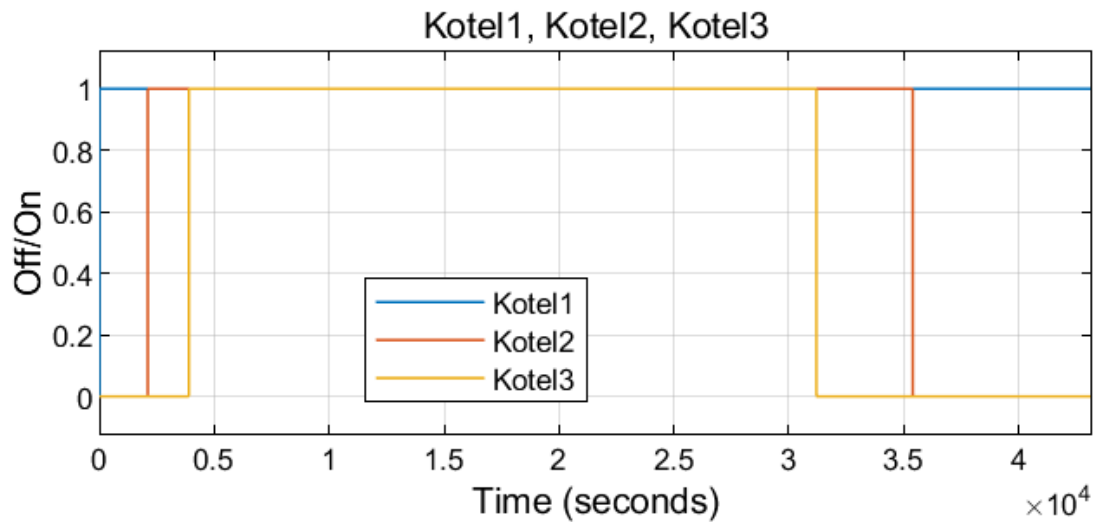
### Ukázka vyhodnocování požadavků

Požadavky v bitové formě přichází na vstup bloku Spouštění kotlů z bloku Test dostatku výkonu. Při špatně nastavených prazích může nastat situace, při které algoritmus vyhodnotí, že je potřeba vypnout kotel a hned zase zapnout. Toto chování vyústí v sérii nepřehledných pulzů, ze kterých je potřeba nalézt jakési východisko. S pomocí bloku, podrobně popsaném v předchozí kapitole se vyfiltrují série požadavků v jednoduché instrukce. Pro konkrétní ukázkou je zvolena následující situace. Na počátku simulace je vygenerován setpoint teploty topné vody na 70 °C, který je poměrně rychle dosažen a přesně v polovině simulační doby hodnota setpointu začíná klesat. Výpis z požadavků na kaskádu vypadá následovně.



Obrázek 17 - Požadavky na kaskádu

Obrázek zachycuje modrou barvou žádosti o zapnutí kotle a oranžovou barvou vypnutí kotle. Tento průběh odpovídá zahájení topení s vysokou, ale klesající žádanou hodnotou. Žádosti na spuštění jsou výstupem přetékajícího integrátoru z velké regulační odchylky. Reakcí bloku na tyto požadavky je vytvoření jednoznačného rozhodnutí o spuštění nebo vypnutí kotle. Výstup znázorňuje tento obrázek.



Obrázek 18 - Stavy kotlů v kaskádě

Z obrázků je patrné, jak chaos v pulzech zapínání který znázorňuje [Obrázek 17] je vyřešen jedním spuštěním kotle a zbytek po definovanou dobu ignorován. Postupně, jak s klesajícím setpointem (není vyobrazen) klesá výkon kotlů, se v závislosti na nastavených prazích odepínání kotle správně vypínají.

## 7 Stávající strategie řízení

Stávající algoritmus řízení kaskády kondenzačních kotlů odpovídá požadavkům na nejrychlejší spuštění všech kotlů v kaskádě a zároveň udržuje kotle v provozu nejdelší možnou dobu (Early on, Late off strategie). Jsou vytvořena pásma, která omezují výkon jednotlivých kotlů a překročení horní či dolní hranice vyvolá adekvátní reakci zbytku kotlové soustavy. Pro lepší představu: při příchodu požadavku na kotelnu obsahující tři paralelně zapojené kotle v kaskádě se spouští první kotel. Pokud výkon kotle nepřesáhne předem zvolenou hodnotu prahu 40 %, tak je vše v pořádku a výkon celé kaskády obstarává právě tento kotel. V případě překročení této hranice vyvolá kaskádní řízení požadavek na spuštění druhého kotle. Mezitím první kotel sníží svůj výkon o velikost startovacího výkonu druhého kotle, aby nedocházelo k nárazovým změnám, a společně se modulují jednou hladinou výkonu. Opět při případném překročení 40% hranice se stejným způsobem připojuje třetí kotel, atd. Až kaskáda dosáhne stavu, kdy jsou všechny dostupné kotle aktivní a jejich výkon stále nestačí, tak v ten okamžik algoritmus umožní všem kotlům modulovat v celém výkonovém rozsahu.

Se snížením žádané teploty na výstupu z kotelny, klesá i požadovaný výkon po kaskádě a výkony jednotlivých kotlů modulují směrem dolů. Při snížení hladiny výkonu pod 25 % se kaskáda připraví na odpojení posledního připnutého kotle tak, že zvýší výkon všech ostatních aktivních kotlů a tím zamezí skokové změně v soustavě. Po odpojení kotle je výkonová hladina kaskády opět řízena modulací. Analogicky probíhá vypínání všech kotlů v kaskádě.

Early on, Late off strategie je aplikovatelná výhradně pro kondenzační kotle, protože jejich nejvyšší účinnost je dosažena při nízkém stupni vytížení. Řízení kaskády obyčejných plynových kotlů se odvíjí od požadavku na vyšší teplotu zpátečky a zamezení kondenzace spalin a s ní spojenou korozi výměníku. Pro klasické plynové kotle se navrhuje řízení Late on, early off, což zaručuje nízký počet aktivních kotlů a s tím spojenou nižší provozní dobu. Další alternativou je Late on, late off přístup, který prodlužuje dobu běhu kotlů a snižuje počet startů hořáku.

Hledání optimálních hranic připínání a odepínání kotlů je jedním z pilířů této práce a proto je model přímo nastaven na testování zmíněné Early off, Late on problematiky. V modelu je řízení pomocí prahů implementovaných prostřednictvím dvou

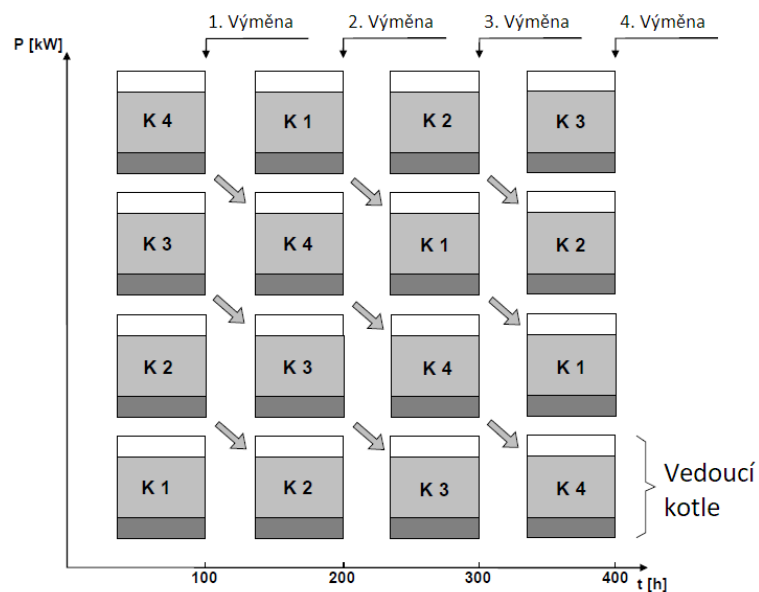


funkcí, které na základě aktuálních hodnot výkonů kotle rozhodují, zda vytvoří požadavek na zapnutí nebo vypnutí kotle.

Algoritmy spouštění jsou ještě upraveny, pokud se po soustavě požaduje i ohřev teplé užitkové vody V takovém případě se nečeká na spuštění všech kotlů v kaskádě, ale řízení automaticky uvolní celý výkon kaskády, aby voda byla vždy připravena v požadované teplotě. V tomto případě by optimum provozu bylo na úkor komfortu. Z důvodu striktního požadavku na okamžitou reakci kaskády není tato funkce objektem optimalizace a v modelu není implementována.

### Rotace kotlů

Aby bylo dosaženo rovnoměrného zatížení všech zapojených kotlů, je vhodné aplikovat algoritmus, podle kterého se bude určovat pořadí jejich spouštění. Rozhodovací logika je založená na době, po kterou byly kotle aktivní. Doba je měřena od startu po zhasnutí hořáku. Implicitně je vytvořena časová hranice, po jejímž překročení se kotel zařadí na metaforický konec kaskády, a nastavena na 100 hodin. Po přesunutí původně vedoucího kotle na pozici s nejnižší prioritou se na pozici s prioritou nejvyšší přesouvá následující kotel v pořadí. Takto navržený algoritmus zajistí, že mezi neaktivnějším a nejméně aktivním kotlem bude rozdíl doby provozu menší než 100 hodin. Tato funkce v modelu implementována není z důvodu přehlednosti řízení kaskády. Způsob rotace vystihuje následující obrázek.



Obrázek 19 - Systém střídání kotlů

## 8 Optimalizace nákladů na provoz

Vytvořený model umožnil simulovat různé výkonové zatížení kaskády a tím se otevřel prostor na hledání optimálního počtu aktivních kotlů při konstantní zátěži. Pro vytvoření homogenních podmínek probíhá ohřívání vody z předem stanovené teploty zpátečky (30 °C). Aby se otestovala celá škála výkonového zatížení, mění se setpoint teploty topné vody od 35 °C až do 70 °C. Všechny kotle jsou připojeny na jeden spouštěcí signál, aby začátek požadavku na topení přišel na všechny jednotky v jeden definovaný okamžik. Tím se eliminovala nepřesnost s postupným připínáním kotlů a vytvořily se tak stabilní ustálené podmínky.

Předpokladem hledání optimálních nákladů je očekávaná vyšší účinnost kondenzačního kotle při nízkém výkonovém stupni. Tento předpoklad vychází z měření na konkrétním kotli Jablotron Aura L a z teorie kondenzace. Otázka kapitoly je: Jaký počet aktivních kotlů je ekonomicky nejvýhodnější pro definované výkonové zatížení.

### 8.1 Výpočet nákladů na provoz

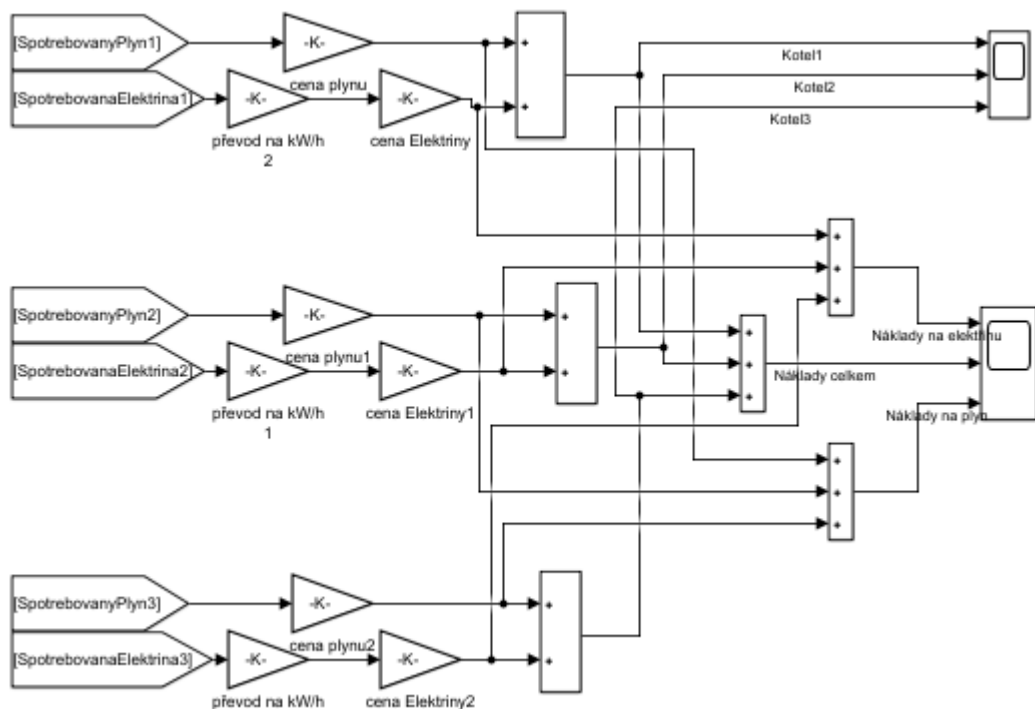
Vzhledem k požadavku na ekonomickou optimalizaci provozu kotelny je hlavním kritériem cena. Hlavní otázkou, na kterou je třeba najít odpověď, je, kde je možné hledat potenciální prostor pro optimalizaci. Cena je v modelu kalkulována následujícím způsobem. Každý kotel má vstup MF, který označuje hmotnostní průtok plynu. Na tento vstup je generován signál, který odpovídá reálnému průtoku plynu a pohybuje se v rozmezí, definovaném v kapitole [6.4 Příprava paliva]. Aktuální hodnota průtoku se přepočítává z hmotnostního průtoku na objemový a integruje. Tímto integrátorem se získá celkový objem spotřebovaného paliva za dobu simulace.

Obdobně se počítá spotřeba i dalších kotlů v kaskádě. Dalším výdajem kaskády je elektrický proud. Protože se jedná o plynové kotle a ne elektrické, je spotřeba elektrické energie závislá na výkonu kotlového čerpadla a ventilátoru. Z kapitoly [5.1 Příkon kotle] je použita závislost spotřeby elektrické energie na výkonu kotle. Naměřenými body byla proložena polynomicky vyjádřená křivka. Její koeficienty jsou

$$E = 0,004211 \cdot P^2 - 0,0744 \cdot P + 65,486$$

P [%] je relativní výkon jednoho kotle a E [W] je elektrická energie. Hodnota elektrické energie je opět posílána do integrátoru a načítána. Tím je uzavřena problematika hledání provozních výdajů a nyní je potřeba zvolit ceny plynu a elektřiny.

Podle internetových stránek energie123.cz [22] je průměrná cena 1 kWh 4,1 Kč (dne 22.2.2019), průměrná hodnota je uvažováno z důvodu nemožnosti predikovat dobu provozu kotelný a nelze tedy vycházet z nízkého ani vysokého tarifu. Lze také předpokládat, že bytové jednotky, které mají zavedeny plynové kotle, nebudou mít velkoodběrovou slevu, jako to bývá u objektů závislých ryze na elektrické energii. Proto je hodnota 4,1 Kč/kWh vnesena do modelu jako výchozí. Dále na webu [23] jsou srovnány ceny jednotlivých dodavatelů plynu. Jedna z nejvýhodnějších nabídek je 8 Kč/m<sup>3</sup> (dne 22.2.2019). Model dále bude počítat právě s touto cenou. Po provedení potřebných převodů jednotek vzniklo schéma:



Obrázek 20 - Schéma výpočtu spotřeby

Vstupy jsou v párech z každého kotle. Jedná se tedy o model kaskády se třemi kotli. Dále lze z uvedeného schématu získat náklady každého kotle a zároveň je možné nalézt i částky, vynaložené pouze na plyn, pouze na elektřinu, nebo celkovou finanční zátěž kaskády. To vše samozřejmě v horizontu doby simulace.

## 8.2 Simulace konstantního požadavku

Samotná simulace proběhla v Simulinku v časovém okně 24 hodin. Tento parametr je zvolen kvůli relativně krátké době výpočtu a zároveň vypovídajícím výsledkům. Pro přehlednost zde je uveden výstup ze simulací ve formě tabulek. Tabulky popisují celkové náklady na udržení žádané teploty při průtoku vody 0,35 l/s. Průtok více

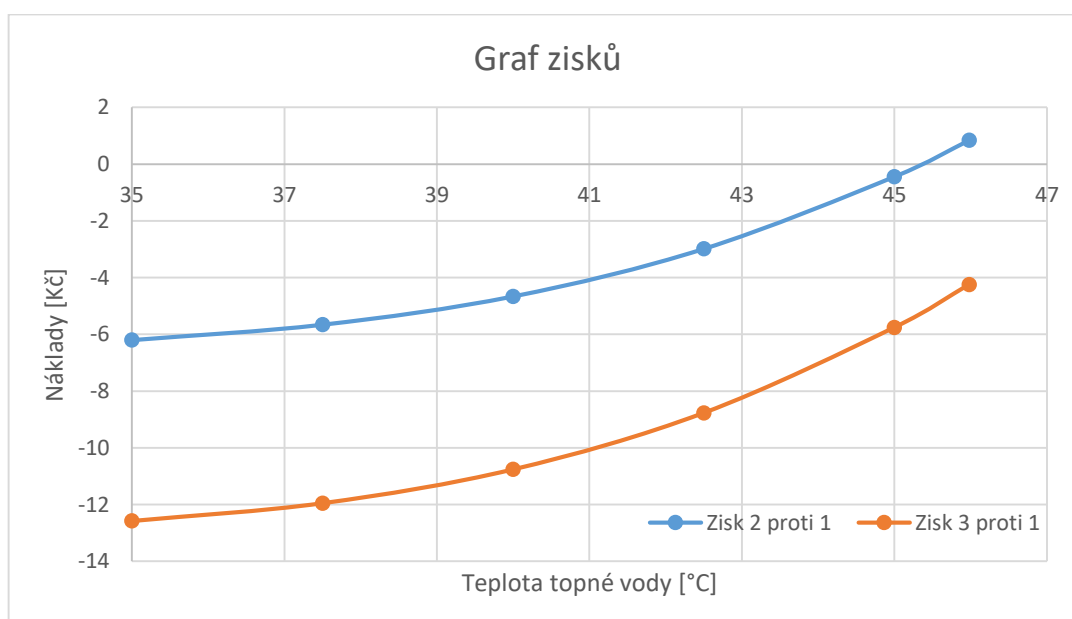
kotli vychází z charakteristiky paralelně spojených čerpadel. Pro zjednodušení se uvažuje, že se průtok dělí rovnoměrně a tedy skutečný průtok jedním kotlem je definovaný jako:

$$mv = \frac{0,35}{\text{počet aktivních kotlů}} \text{ [l/s]}$$

Tabulka 7 - Srovnání nákladů na provoz kaskády 1

Náklady [Kč]	Teplota topné vody [°C]						
	35	37,5	40	42,5	45	45,98	47,5
1 kotel	147,3	218,9	291,2	364,7	439,5	469,2	X
2 kotle	153,6	224,5	295,9	367,7	439,9	468,3	512,6
3 kotle	159,9	230,8	302	373,5	445,2	473,4	517,3
Zisk 2-1	-6,2	-5,6	-4,7	-3	-0,4	0,9	X
Zisk 3-1	-12,6	-11,9	-10,8	-8,8	-5,7	-4,2	X

Teplota 45,98 °C je hodnota, která odpovídá 100 % výkonu jednoho kotle. To znamená, že za definovaných podmínek (hlavně průtoku) není možné jedním kotlem ohřát vodu na víc, než právě 45,98 °C. Zisk se počítá z pohledu připnutí druhého (resp. třetího) kotle v situaci, kdy by jeden kotel ještě mohl stačit. Z hodnot zisků vychází graf.



Obrázek 21 - Graf zisků při nízkém vytížení kaskády

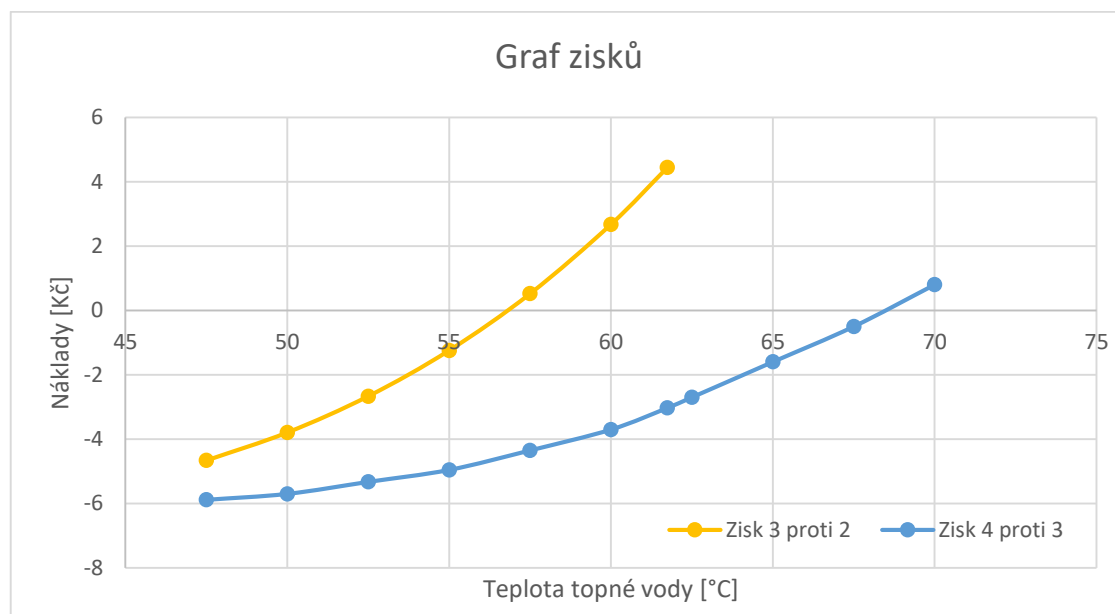
Z těchto informací vyplývá, že za předpokladu, že lze požadavky na teplo pokrýt jedním kotlem, se ve velké části nevyplatí zapínat další. Pomyslná hranice, za kterou zisk začíná nabývat kladných hodnot je 93% výkonu jednoho kotle. Jinými slovy by bylo vhodné připnout další kotel pouze, když se aktuální vytížení pohybuje v rozmezí 93 % – 100 %.

Stejnou logikou je postupováno i při hledání hranice pro provoz dvou a více kotlů. Z proběhlé simulace lze bezpečně rozhodnout, že nenastane situace, kdy by se ekonomicky vyplatilo připnout hned dva kotle. Zvýšení účinnosti sice proběhne, ale peníze ušetřené za plyn se vynaloží na elektřinu. Z toho důvodu se dále bude uvažovat pouze porovnání dvou variant. Na rozdíl od výše popsaného modelu, je pro účely tohoto experimentu přidán ještě jeden kotel, takže maximální počet kotlů je čtyři.

Hodnoty z porovnání tří kotlů proti dvěma a čtyř kotlů proti třem jsou opět rozepsány do tabulky, na kterou navazuje graf zisků obou srovnání.

Tabulka 8 - Srovnání nákladů na provoz kaskády 2

Náklady [Kč]	Teplota topné vody [°C]										
	47,5	50	52,5	55	57,5	60	61,74	62,5	65	67,5	70
2 kotle	512,6	585,9	659,8	734,5	809,9	886,1	939,7	X	X	X	X
3 kotle	517,3	589,7	662,5	735,7	809,3	883,4	935,3	958,3	1033	1109	1185
4 kotle	523,2	595,4	667,8	740,7	813,7	887,1	938,3	961	1035	1109	1184
Zisk 3-2	-4,66	-3,79	-2,67	-1,24	0,52	2,675	4,44	X	X	X	X
Zisk 4-3	-5,88	-5,7	-5,33	-4,96	-4,35	-3,7	-3,03	-2,7	-1,6	-0,5	0,8



Obrázek 22 - Graf zisků kotelny

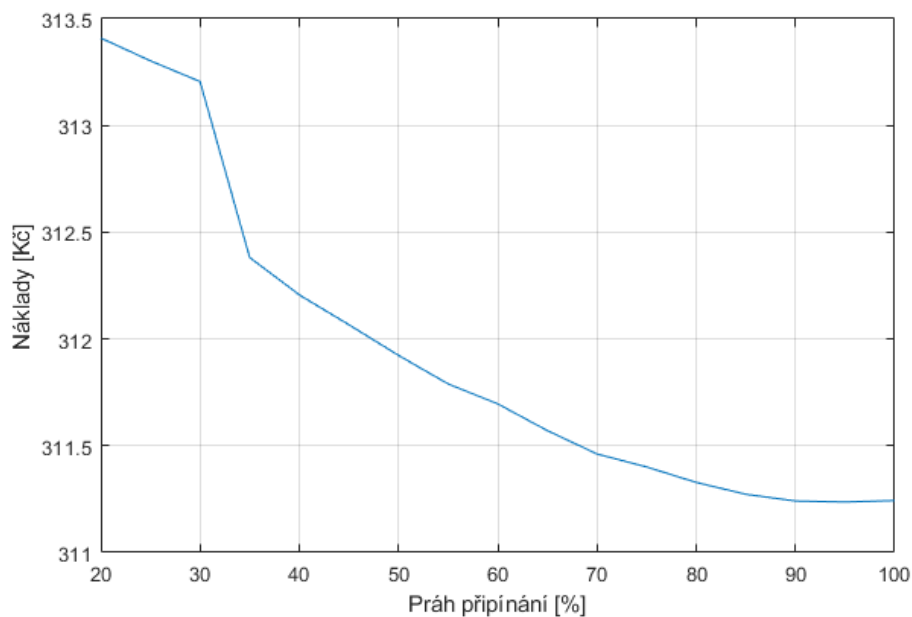
Důležitou informací je, že výkonová hladina odpovídající přechodu grafu zisku do kladných hodnot je 86 %. V porovnání s předchozí simulací je zřejmé zvětšení pásma pro případný zisk. Tato změna byla příčinou rozšíření modelu o další kotel. Další kotel byl vytvořen s úmyslem najít směr, kterým se hranice zisk = 0 ubírá. Hranice přechodu mezi provozem tří nebo čtyř kotlů leží na 81,5 %. (Pozn. V grafu [Obrázek 22] je vidět, že nejvyšší teplota, na kterou kaskáda ohřívá vodu, je 70 °C. Toto není maximální možná teplota, kterou tři kotle jsou schopny vyprodukovat, jedná se pouze zvolený strop).

Výstupem této části práce je potvrzení existence hranice, při které se začíná vyplácet provoz více kotlů s nižším výkonovým zatížením. Oproti očekávání je tato hranice poměrně vysoko a praktické využití bude mít spíše v instalacích s více kotli. Návrh ekonomického řízení pro ustálený stav soustavy by mohl vypadat tak, že pokud se aktuálně systém výkonově pohybuje v pásmu nad hranicí, tak připnout další kotel a pokud pod, tak odepnout. Nutno mít ještě na paměti, že s připnutím kotle se načítají i kotlové hodiny a tedy, když je kotel aktivní, tak se opotřebovávají akční členy.

### 8.3 Simulace připínání kotlů

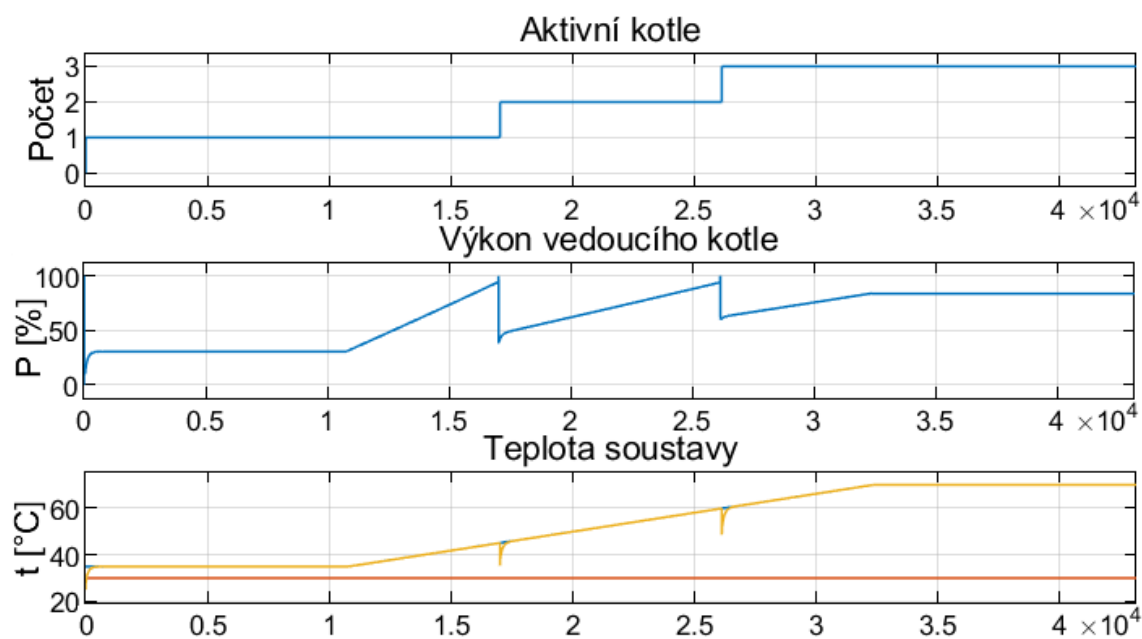
Pro nalezení hranice optimální hranice připínání je možné vycházet z předchozí simulace. Je tedy možné očekávat ekonomicky nejvýhodnější moment pro připojení dalšího kotle při 90% výkonu předchozích kotlů. Otázkou ale zůstává, kdy je vhodné ze stávající množiny aktivních kotlů jeden odebrat. Simulace spočívá ve vytvoření jedné vzorové situace, na kterou kaskáda reaguje s různým nastavením. O optimu daného nastavení se rozhoduje v závislosti na celkových nákladech.

Nejprve je pozornost zaměřena na rostoucí žádanou teplotu topné vody. Tato teplota je generována rampovou funkcí od hodnoty teploty zpátečky zvýšené o 5 °C až na 70 °C. Začíná 3 hodiny po začátku simulace a náběh trvá 6 hodin. Kvůli iteračnímu charakteru hledání vhodného prahu je doba simulace oproti předchozímu experimentu zkrácena na 12 hodin a v kaskádě jsou tři kotle. Pro zvýšení přesnosti simulace je vytvořen citlivější práh integrace, než se skutečně používá. Práh integrace je nastaven na  $0,4 \cdot 60$  [K·s], což odpovídá přijatelné regulační odchylce 0,4 K po dobu jedné minuty. Výpočet nákladů na provoz probíhá podle [Obrázek 20].



Obrázek 23 - Závislost nákladů na prahu připínání

Po provedení simulace je patrné, že funkce znázorněná na výše uvedeném obrázku má své minimum v rozmezí 90 - 95 %. Z grafu vyplývá, že prostým nastavením prahů připínání je možné zasáhnout do nákladů na provoz kotleny. Pro úplnost jsou dále uvedena data z kotleny s nastavením, odpovídajícím minimálním nákladům. Podkmity na grafu Teplota soustavy jsou způsobeny připnutím dalšího kotle, jehož výměník je plný ještě neohřáté vody (25 °C) a ta se vypláchne na společný senzor teploty.



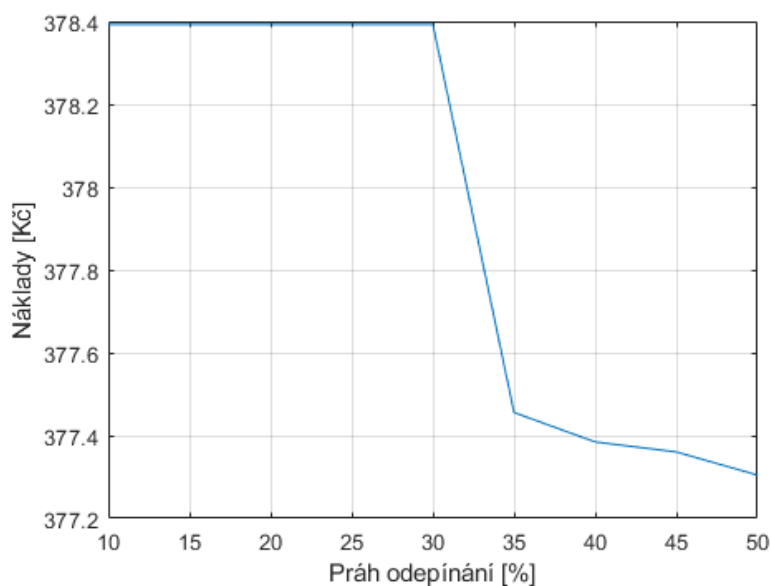
Obrázek 24 - Zvyšování nároků na výkon

## 8.4 Simulace odepínání kotlů

Hledání prahu odepínání probíhalo v podobném duchu, jako pro práh připínání. Opět se pomocí for cyklu měnilo nastavení prahu a počítaly se celkové náklady předem definovaného charakteru provozu. Na úvod je vhodné zmínit předpoklady, se kterými simulace proběhne. Je možné očekávat optimální odepínací hranici vždy nižší, než je polovina té připínací. Pokud by tento předpoklad splněn nebyl, bude docházet k cyklaci kotlů a výkonový rozsah kaskády nebude spojitý.

Například, pokud by hranice odepínání byla nastavena na 60 % výkonu tak v případě dvou kotlů v kaskádě a přebytku výkonu by se vypnul druhý kotel a první kotel by v tu chvíli pro spojitý přechod musel vymodulovat na 120 %, což není možné. Zároveň, pokud by připínací hranice byla 90 % a odepínací vyšší než polovina (např. 47 %), tak po odepnutí kotle musí první vymodulovat na  $2 \cdot 47$  tedy 94 % což je za hranicí připínání a opět připnout. Tím by došlo ke zmíněné cyklaci kotlů.

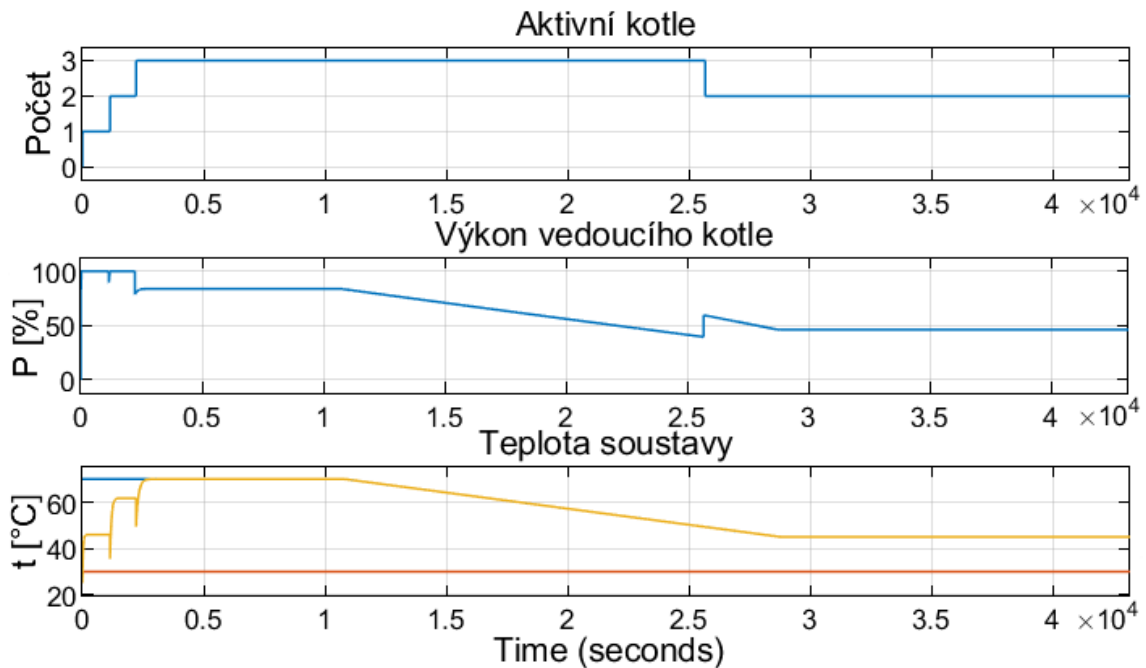
Pro simulaci přebytku výkonu je vytvořena situace, ve které musí kaskáda ohřát vodu na 70 °C a pak postupně snižovat setpoint teploty vody až k 45 °C. Teplota zpátečky je nastavena na 30 °C. Rozhodování o vypínání kotlů pro tento pokus neprobíhá pomocí integrace přebytku tepla, ale pouze na základě aktuálního výkonového zatížení kaskády. Tím se eliminují vnější zásahy do pokusu a získávají přesnější data. Výstupem je závislost nákladů na prahu odepínání, znázorněná na následujícím obrázku.



Obrázek 25 - Závislost nákladů na prahu odepínání



Z obrázku lze vyčíst, že pokud je práh nastavený příliš nízko, tak celý potřebný výkon se rozloží mezi všechny tři kotle a žádný kotel se nevypne. V takové situaci jsou náklady na 12-ti hodinový provoz 378,4 Kč. Pokud se ale práh zvolí optimálně, tak je možné vypnout jeden kotel a za tu stejnou dobu ušetřit na nákladech a ještě k tomu ušetřit na provozních hodinách jednoho kotle.



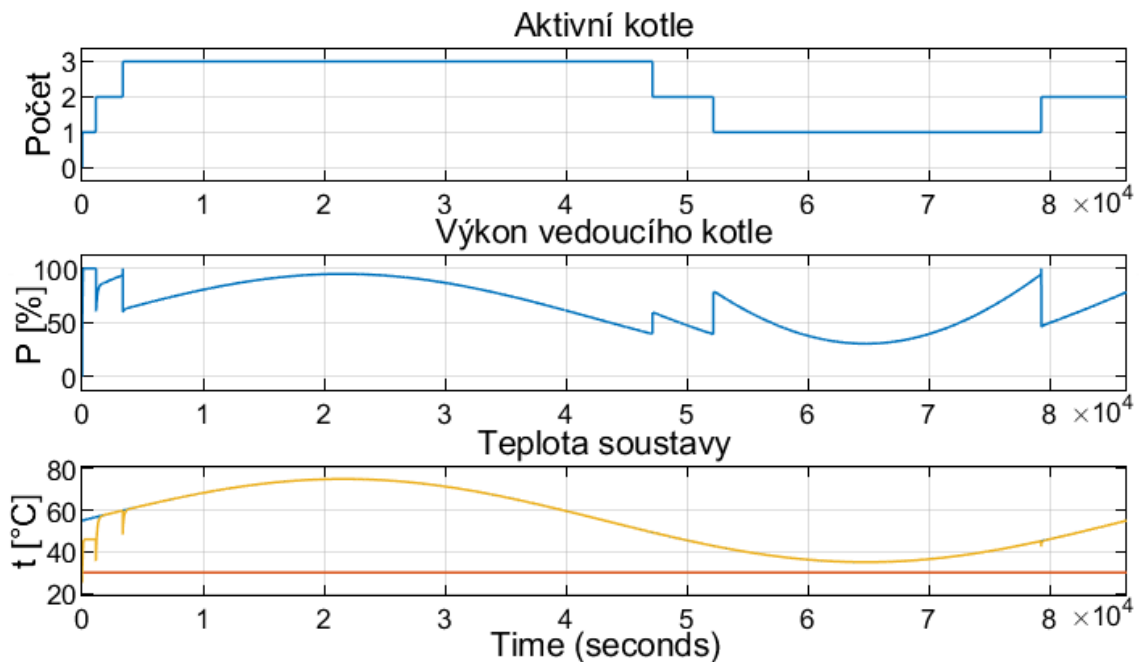
Obrázek 26 - Snižování nároků na výkon

Obrázek 26 popisuje stav v důležitých místech modelu pro nastavení prahu odepnutí na 40 %. Nejprve je vhodné si uvědomit, proč je výkon hlavního kotle na 100 %, když práh připínání je 93 % (prostřední graf). Tento akční zásah je vyvolán vysokou regulační odchylkou na začátku simulace. Jak je dále vidět, tak výkon jednoho kotle na pokrytí této odchylky nestačí a se zapnutím 1. kotle se spustila 15 minut dlouhá pauza na ustálení stavu. Během této pauzy se nesmí připnout další kotel, takže první kotel moduluje i za hranice svého rozsahu, aby došlo k ustálení výstupu. Stejně tak probíhá řízení i po připojení druhého kotle a až se třetím kotlem se odstraní regulační odchylka a kaskáda pracuje v optimálním rozsahu.

Kdyby nastavení prahu odepínání proběhlo výhradně podle minima v grafu [Obrázek 25], docházelo by k už několikrát zmíněnému periodickému zapínání a vypínání kotlů. Tento stav je pro reálnou soustavu nepřijatelný a proto je vhodnější zvolit práh s nepatrně vyššími náklady, ale s pásmem necitlivosti, které pomáhá kaskádě setrvat v aktuálním stavu.

## 8.5 Simulace reálných podmínek

Po nalezení prahu odepínání a připínání byla na modelu provedena ještě jedna simulace. Do modelu byly zapsány nalezené parametry a na vstup žádané hodnoty teploty se vygeneroval signál, vyjadřující reálné požadavky na kaskádu. Jedná se o sinusový průběh s periodou 24 hodin, který popisuje očekávané chování kaskády v průběhu dne a prochází všechny výkonové hladiny.



Obrázek 27 - Simulace reálného zatížení kaskády

Z výše uvedeného obrázku je možné vysledovat, jak kaskáda zareagovala na měnící se výkonové požadavky. Kotle se udržují v pásmu vymezeném pro optimální modulaci a při překročení jedné z hranic tohoto pásma kaskáda adekvátním zásahem zareaguje. Oproti standardnímu řízení, uvedeném v kapitole Stávající strategie řízení, se po finanční stránce ušetří sice pouze jedna koruna, ale v širším vnímání při uvažování 200 denní topné sezóny a desetileté morální životnosti kotle tato částka zanedbatelná není. Nutno ještě připomenout, že této optimalizace lze docílit bez jakýchkoli montážních zásahů. S nadsázkou je možné říci, že k optimálnějšímu řízení lze dojít pouhým přenastavením firmwaru. Další nespornou výhodou tohoto stylu řízení je snížení doby chodů kotle. Kotle v kaskádě, řídicí se novým návrhem, ušetří oproti původnímu stavu 5,78 hodin provozu v součtu časů všech kotlů za den (Dříve - 58,09 hod/den, Nyní - 52,31 hod/den). Šetří se tak akční členy a při správně implementované rotaci kotlů i prodlužuje jejich životnost. Toto řízení minimalizuje náklady společně s dobou provozu.

Na závěr této kapitoly je vhodné se vrátit k premisám na začátku, a připomenout, že veškeré experimenty proběhly pro zvolené ceny elektřiny a plynu. Tyto ceny ve skutečnosti nejsou konstantní. V situaci, kdy by byl požadavek na optimalizování spotřeby plynu bez ohledu na dodanou elektrickou energii, tak by ideální hodnoty prahů odepínání a připínání byly výrazně odlišné. Při optimalizaci spotřeby plynu je veškerá pozornost věnována jednotlivým kotlům a připnutí dalšího kotle ve své podstatě nic nebrání. Nastane situace, i kdy při minimálním požadavku na topení spíná největší počet kotlů, protože jejich nejvyšší účinnost je dosažena při minimálním výkonu. Pro optimalizaci spotřeby plynu vychází hodnota prahu připínání na 52 % a prahu odepínání 20 %. I zde se musí dodržet zásada omezující cyklaci kotlů. S tímto nastavením se zachovají vlastnosti kaskády, ale její náklady a doba provozu, spojené s více aktivními kotli, už nejsou optimální.

## 9 Závěr

Tato práce je zaměřená na optimalizaci kaskády kondenzačních kotlů z ekonomického hlediska. Teoretická část práce rozebírá druhy kotlů a popisuje jejich základní vlastnosti. Zvýšená pozornost je věnována kondenzačním kotlům, které jsou předmětem optimalizace. Vysvětluje se zde princip kondenzace a zisk latentního tepla, které se využívá na předehřev vody. Dále je zde rozebraný kondenzační kotel a vysvětleny funkce jeho komponent. Popisuje se řešení odvodu kondenzátu a nakonec se znázorňuje rozdíl mezi výhřevností a spalným teplem.

Po seznámení s kondenzačními kotli se práce zaměřuje na problematiku řízení tepelných zdrojů v kaskádě. Kromě obecných požadavků na provoz kaskády je zde nastíněn princip několika základních metod, podle kterých se navrhuje řízení kotlů. Nacházejí se zde často užívané metody jako například řízení podle ekvitermní křivky, nebo podle teploty kotlové vody, nebo i méně časté řízení podle rozdílu teplot přívodní vody a zpátečky.

Na kapitulu o řízení navazuje princip zapojení kotlů v kaskádě. Zde jsou vysvětleny dva základní přístupy k zapojení kotlů a jejich možné využití v praxi, na což dále navazuje popis bloku termohydraulického rozdělovače, který je nutné použít, pokud se uvažuje o vytápění objektu kaskádou kotlů. THR vyrovnává průtoky mezi primární a sekundární částí a zajišťuje tak hydraulickou rovnováhu soustavy. Na závěr této kapitoly je uvedeno schématické zapojení soustavy obsahující kotlovou kaskádu a tím je uzavřena teoretická část práce.

Měření vlastností kondenzačního kotle probíhalo ve spolupráci s Jablotron Living Technology CZ s.r.o. Jako testovaný plynový kondenzační kotel byl zvolen AURA L. Dále bylo potřeba navrhnout hydraulické uspořádání soustavy tak, aby bylo možné měřit jeho vlastnosti v celém výkonovém rozsahu. Byl proto navržen topný okruh, který obsahoval: akumulární nádobu, třicestný ventil a chladicí vodu z tepelného čerpadla (pro vysoké výkony byla použita voda z vodovodního řádu). Chladicí vodou se pomocí spirál v akumulární nádobě snižovala teplota okruhové vody. Pro zajištění stálé teploty zpátečky byl před vstup do kotle vložen třicestný ventil, kterým se teplota řídila. V tomto měření jsou nalezeny závislosti teploty spalin, elektrického příkonu, účinnosti spalování, teploty vody a spotřeby paliva na teplotě zpátečky a aktuálním výkonovém zatížení kotle.

Pro samotný návrh strategie řízení bylo potřeba vytvořit model, na kterém budou všechny teorie testovány. Vytvoření modelu kondenzačního kotle umožnil software jménem Simscape. Tento program rozšiřuje aplikovatelnost Simulinku o modelování fyzikálních systémů. Po seznámení se syntaxí a základními stavebními bločky byl vytvořen model plynového kotle a model místnosti o předem definované tepelné ztrátě. Později se ukázalo, že simulace modelu místnosti je velmi výpočetně náročná, což znemožňovalo jakékoli ladění navrhovaného řízení a proto bylo model místnosti nahrazen zdrojem vody o definované teplotě a průtoku. Tato náhrada se ukázala pro potřeby simulace jako naprosto dostačující.

V práci jsou popsány všechny vytvořené bloky, umožňující simulovat různé stavy kaskády i soustavy. Vytvořenými bloky jsou: spalovací komora, řízení kotle, řízení kaskády, příprava paliva atd. Na vytvořeném modelu se navrhuje optimalizace nákladů na provoz. Tato metoda je výhodná především tím, že se jednotlivé vstupy a výstupy přepočítají na jednu veličinu (cenu), kterou je vhodné porovnávat. Pro nalezení vhodného počtu aktivních kotlů jsou zde vytvořeny tři situace. Nejprve konstantní zatížení kaskády, jehož výstup slouží k nalezení prahu připínání. Dále rostoucí zatížení a nakonec klesající zatížení. Pomocí těchto tří simulací a přepočtu na náklady na provoz je navrženo optimální řízení z hlediska ceny. V závěru kapitoly je popsáno i nastavení kaskády pro optimalizaci spotřeby plynu (bez uvažování spotřebované elektrické energie). Nakonec je provedena simulace reálných podmínek a vypsání výstupy reakcí kaskády. Tato simulace je doprovázena porovnáním se standardním nastavením z pohledu nákladů i z pohledu doby provozu kotlů.

## Použitá Literatura

- [1] Směrnice Evropského Parlamentu a Rady (EU) 2018/844. [Online] Úřední Věstník Evropské Unie L 156. [Citace: 16. 2. 2019.] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L0844&from=CS>.
- [2] Výběr kaskádového zapojení. [Online] Bergen SK s.r.o. [Citace: 12. 4. 2019.] [http://www.bergen.cz/img/Technicke\\_dokumenty\\_Master\\_Line\\_Plus/Vyber\\_kaskadoveho\\_zapojeni\\_Plus.pdf](http://www.bergen.cz/img/Technicke_dokumenty_Master_Line_Plus/Vyber_kaskadoveho_zapojeni_Plus.pdf).
- [3] Volba zdroje tepla pro vytápění rodinného domu. *tzb-info.cz*. [Online] V-systém elektro s.r.o. [Citace: 12. 12. 2018.] <https://vytapani.tzb-info.cz/vytapime-elektrinou/10771-volba-zdroje-tepla-pro-vytapani-rodinneho-domu>.
- [4] Spotřeba paliv a energií v domácnostech. [Online] Český statistický úřad. [Citace: 10. 4. 2019.] <https://www.czso.cz/csu/czso/struktura-pouzivanych-paliv-a-energi>.
- [5] Valenta, Vladimír. Kondenzační kotel pro každého. *tzb-info.cz*. [Online] [Citace: 24. 4. 2019.] <https://vytapani.tzb-info.cz/vytapime-plynem/868-kondenzacni-kotel-pro-kazdeho-i>.
- [6] Návod na instalaci, obsluhu a údržbu kotle. *Thermona.cz*. [Online] [Citace: 16. 12. 2018.] <https://www.thermona.cz/getattachment/fe5197bf-9347-4dfc-8921-a98455d1cec2/THERM-25-KDC.aspx>.
- [7] Soukup, Jan. Kondenzační kotle a praxe. *tzb-info.cz*. [Online] [Citace: 29. 11. 2018.] <https://vytapani.tzb-info.cz/kotle-kamna-krby/12327-kondenzacni-kotle-a-praxe>.
- [8] Fučík, Zdeněk. Teorie kondenzace. *tzb-info.cz*. [Online] [Citace: 5. 12. 2018.] <https://vytapani.tzb-info.cz/vytapime-plynem/1912-strucna-teorie-kondenzace-u-kondenzacnich-plynovych-kotlu>.
- [9] Elektrické kotle. [Online] Thermona. [Citace: 10. 4. 2019.] <https://www.thermona.cz/elektrokotle>.
- [10] Účinnost elektráren. [Online] IAEA Bulletin. [Citace: 10. 4. 2019.] [http://www.energyweb.cz/web/index.php?display\\_page=2&subitem=2&slovník\\_page=ucinost.html](http://www.energyweb.cz/web/index.php?display_page=2&subitem=2&slovník_page=ucinost.html).

- [11] Komfort kotlů na tuhá/pevná paliva. *tzb-info.cz*. [Online] [Citace: 10. 4. 2019.] <https://vytapani.tzb-info.cz/vytapime-tuhymi-palivy/17137-komfort-kotlu-na-tuha-pevna-paliva-cast-i>.
- [12] Regulace teploty v domě. [Online] Viessmann, spol. s.r.o. [Citace: 10. 4. 2019.] <https://www.viessmann.cz/cs/rady-a-tipy/regulace-teploty-v-dome.html>.
- [13] Prof. Ing. Jiří Bašta, Ph.D. Řízení kotlů v kaskádě. *Vytápění, větrání, instalace*. Praha : ČVUT, 2011.
- [14] Matz, Václav. Ekvitermní regulace. *tzb-info.cz*. [Online] [Citace: 15. 12. 2018.] <https://vytapani.tzb-info.cz/mereni-a-regulace/6294-ekvitermni-regulace-princip-a-vyuziti-v-systemech-regulace-vytapani>.
- [15] Termohydraulický rozdělovač. *tzb-info.cz*. [Online] [Citace: 12. 12. 2018.] <https://vytapani.tzb-info.cz/12499-termohydraulicky-rozdelovac>.
- [16] Vliv neudržovaného spotřebiče na kvalitu spalování. [Online] *tzb-info.cz*. [Citace: 10. 4. 2019.] <https://vytapani.tzb-info.cz/vytapime-plynem/14284-jak-muze-ovlivnit-kvalitu-spalovani-zemniho-plynu-nedostatek-vzduchu-neudrzovany-komin-a-neudrzovany-spotrebic>.
- [17] HM8115-2 Power meter. *Farnell*. [Online] [Citace: 19. 1. 2019.] <http://www.farnell.com/datasheets/318533.pdf>.
- [18] Spalné teplo. [Online] ČSN 44 1352, ČSN EN ISO 1716. [Citace: 10. 12. 2018.] [https://fbiweb.vsb.cz/materialy/NM/pdf/spalene\\_teplo.pdf](https://fbiweb.vsb.cz/materialy/NM/pdf/spalene_teplo.pdf).
- [19] Schwarzer, Jan. Teorie vlhkého vzduchu. *tzb-info.cz*. [Online] [Citace: 10. 12. 2018.] <https://vetrani.tzb-info.cz/teorie-a-vypocty-vetrani-klimatizace/3323-teorie-vlhkeho-vzduchu-i>.
- [20] OpenTherm. [Online] OpenTherm® Association. [Citace: 10. 4. 2019.] <https://www.opentherm.eu/using-the-protocol/>.
- [21] Fík, Josef. Základní fyzikální vlastnosti zemního plynu. *tzb-info.cz*. [Online] [Citace: 5. 3. 2019.] <https://vytapani.tzb-info.cz/vytapime-plynem/1921-zakladni-fyzikalni-vlastnosti-zp-i>.

[22] Aktuální cena elektřiny. *Energie123.cz*. [Online] [Citace: 22. 2. 2019.]  
<https://www.energie123.cz/elektrina/ceny-elektricke-energie/cena-1-kwh/> .

[23] Ceník plynu 2019. *Ušetřeno.cz*. [Online] [Citace: 22. 2. 2019.]  
<https://www.usetreno.cz/energie-plyn/cena-plynu/#gref>.