

UNIVERZITA PARDUBICE
Fakulta elektrotechniky a informatiky

**NÁVRH REGULACE V SYSTÉMECH VYTÁPĚNÍ A
KLIMATIZACE**

Bc. Jan Tesner

Diplomová práce

2021

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan Tesner**
Osobní číslo: **I19306**
Studijní program: **N0714A150005 Automatické řízení**
Studijní obor: **Automatické řízení**
Téma práce: **Návrh regulace v systémech vytápění a klimatizace**
Zadávající katedra: **Katedra řízení procesů**

Zásady pro vypracování

Cíl práce: Navrhnout postup pro návrh řídicích obvodů s PI(D) regulátory v zařízeních větrání, vytápění a klimatizace. Zaměřit se na praktické aspekty a podrobný popis postupu, vhodný i pro techniky bez teoretických znalostí.

V teoretické části zhodnoťte používané praktické přístupy a jejich výhody a nevýhody z pohledu teorie regulace. Srovnajte různé typy regulovaných technologií, které se vyskytují v systémech řízení budov (topný okruh, regulace výměníku, regulace (kaskády) kotlů, VZT jednotka s přívodní i odtahovou regulací, zónová regulace (fancoil, radiátor)).

V praktické části práce navrhnete způsoby, jak z technických dat projektu či hodnot měřených jednoduchými provozními nástroji odhadnou parametry regulátorů, a postup, jak je pak doladit při uvádění systému do provozu. Vzniklý návod prakticky ověřte na několika technologických zařízeních podle vlastního výběru, ideálně ve spolupráci s technikou měření a regulace, kteří poskytnou zpětnou vazbu. Výsledky zhodnoťte z hlediska možného využití v provozní praxi.

Rozsah pracovní zprávy:
Rozsah grafických prací:
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

Větrání a klimatizace. 3., zcela přeprac. vyd. Brno: BOLIT-B Press, 1993. ISBN 80-901574-0-8.
VALTER, Jaroslav. *Regulace v praxi, aneb, Jak to dělám já*. Praha: BEN – technická literatura, 2010. ISBN 978-80-7300-256-5.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Daniel Honc, Ph.D.**
Katedra řízení procesů

Datum zadání diplomové práce: **6. listopadu 2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **21. května 2021**

L.S.

Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.
děkan

Ing. Daniel Honc, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 16. listopadu 2020

Prohlášení

Prohlašuji:

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

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

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

V Pardubicích dne 19. 5. 2021

Jan Tesner

Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Danielu Honcovi, Ph.D. za odborné vedení mé diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Janu Vidimovi za odborné konzultace a mnoho cenných informací z praxe od něho i od kolegů z firmy Domat Control System s.r.o. Také bych chtěl poděkovat rodině za podporu při cestě za mým vysokoškolským vzděláním.

V Pardubicích dne 19. 5. 2021

Jan Tesner

ANOTACE

Tato diplomová práce se zabývá návrhem regulace pro systémy vytápění a klimatizace. V práci jsou uvedeny teoretické postupy k návrhu regulace a také praktické postupy používané SW techniky. Praktická část obsahuje popis jednotlivých soustav (VZT, TUV), určení parametrů PI(D) regulátoru pomocí vybraných teoretických metod a následné ověření v praxi na budově Beethoven a CP Čestlice. Nakonec je zde sepsán stručný návrh postupu regulace.

KLÍČOVÁ SLOVA

PID regulátor, parametry regulátoru, regulace, vytápění, klimatizace

TITLE

CONTROL DESIGN IN HVAC SYSTEMS

ANNOTATION

This diploma thesis deals with the design of regulation for heating and air conditioning systems. The thesis presents theoretical procedures for the design of regulation as well as practical procedures used by SW technicians. The practical part contains a description of individual HVAC systems, determination of parameters of PI(D) controller using selected theoretical methods and subsequent verification in practice at the Beethoven building and CP Čestlice building. Finally, a brief proposal of the regulation procedure is written here.

KEYWORDS

PID controller, controller parameters, regulation, heating, air conditioning

OBSAH

SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK	9
SEZNAM SYMBOLŮ PROMĚNNÝCH VELIČIN A FUNKCÍ.....	10
SEZNAM ILUSTRACÍ	11
SEZNAM TABULEK.....	13
ÚVOD	
1 TEORETICKÁ ČÁST	15
1.1 REGULACE	15
1.1.1 PID regulátor.....	15
1.1.2 Složky PID regulátoru.....	16
1.2 Používané postupy regulace.....	18
1.2.1 Teoretické postupy	18
1.2.2 Praktické postupy	23
1.3 TYPY REGULOVANÝCH TECHNOLOGIÍ.....	30
1.3.1 Topný okruh.....	31
1.3.2 Výměník.....	32
1.3.3 Kaskáda kotlů.....	32
1.3.4 VZT jednotka s přívodní i odtahovou regulací	33
1.3.5 Zónová regulace	34
1.4 IDEÁLNÍ SYSTÉM VERSUS REALITA	35
1.4.1 Dopravní zpoždění	35
1.4.2 Nelinearita	36
1.4.3 Dimenzování prvků.....	36
1.5 VNĚJŠÍ VLIVY	36
1.5.1 VZT – venkovní teplota, teplota vody rozdělovače	37
1.5.2 ÚT – teplota vody rozdělovače, teplota v místnostech	37
2 PRAKTICKÁ ČÁST.....	38
2.1 REÁLNÉ SOUSTAVY.....	38
2.1.1 Beethoven – VZT	38
2.1.2 Beethoven – TUV	47

2.1.3	CP Čestlice.....	55
2.2	NÁVRH POSTUPU REGULACE	64
3	ZHODNOCENÍ	66
4	ZÁVĚR	68
	POUŽITÁ LITERATURA	69
	PŘÍLOHY	70

SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK

FM	Frekvenční měnič
MaR	Měření a regulace
PC	Personal Computer
PLC	Programovatelný logický automat
PWH	Potable Water Hot
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition
SW	Software
TUV	Teplá užitková voda
ÚT	Ústřední topení
VS	Výměňiková stanice
VZT	Vzduchotechnická jednotka

SEZNAM SYMBOLŮ PROMĚNNÝCH VELIČIN A FUNKCÍ

A'	pomocný parametr metody překmitu
e	regulační odchylka, °C
K_P	zesílení regulátoru
K_{PO}	zesílení otevřeného regulačního obvodu
t	čas, s
T_D	derivační časová konstanta, s
T_I	integrační časová konstanta, s
t_m	doba dosažení prvního maxima, s
T_y	doba kmitu, s
u	akční veličina
w	žádaná veličina, °C
y	regulovaná veličina, °C
κ	relativní překmit

SEZNAM ILUSTRACÍ

Obr. 1.1 – Regulační obvod	15
Obr. 1.2 – Seřízení pomocí experimentální metody „pokus – omyl“ (Vítečková, 2011)	20
Obr. 1.3 – Seřizování podle metody čtvrtinového tlumení (Vítečková, 2011).....	21
Obr. 1.4 – Seřizování podle metody překmitu (Vítečková, 2011).....	23
Obr. 1.5 – Topný okruh	31
Obr. 1.6 – Tepelné výměníky	32
Obr. 1.7 – Kaskáda kotlů	33
Obr. 1.8 – Vzduchotechnická jednotka.....	34
Obr. 1.9 – Zónová regulace (Jablotron, 2013).....	35
Obr. 2.1 – Administrativní budova Beethoven.....	38
Obr. 2.2 – Technologické schéma soustavy Beethoven – VZT Beethoven	39
Obr. 2.3 – Blok PI regulátoru	40
Obr. 2.4 – Vlastnosti bloku PI regulátoru	40
Obr. 2.5 – Výchozí nastavení regulace soustavy Beethoven – VZT	41
Obr. 2.6 – Přejchodová charakteristika $y(t)$ pro určení parametrů pomocí experimentální metody „pokus – omyl“ u soustavy Beethoven – VZT	42
Obr. 2.7 – Výsledný regulační děj experimentální metody „pokus – omyl“ pro soustavu Beethoven – VZT.....	43
Obr. 2.8 – Přejchodová charakteristika $y(t)$ pro určení parametrů pomocí metody čtvrtinového tlumení u soustavy Beethoven – VZT	44
Obr. 2.9 – Výsledný regulační děj metody čtvrtinového tlumení pro soustavu Beethoven – VZT.....	45
Obr. 2.10 – Přejchodová charakteristika $y(t)$ pro určení parametrů pomocí metody překmitu u soustavy Beethoven – VZT.....	46
Obr. 2.11 – Výsledný regulační děj metody překmitu pro soustavu Beethoven – VZT	47
Obr. 2.12 – Technologické schéma soustavy Beethoven – TUV	48
Obr. 2.13 – Další část technologického schématu se zásobníkem odpadního tepla.....	48
Obr. 2.14 – Výchozí nastavení regulace soustavy Beethoven – TUV	49
Obr. 2.15 – Přejchová charakteristika $y(t)$ pro určení parametrů pomocí experimentální metody „pokus – omyl“ u soustavy Beethoven – TUV	50

Obr. 2.16 – Výsledný regulační děj experimentální metody „pokus – omyl“ pro soustavu Beethoven – TUV	51
Obr. 2.17 – Přejchodová charakteristika $y(t)$ pro určení parametrů pomocí metody čtvrtinového tlumení u soustavy Beethoven – TUV	52
Obr. 2.18 – Výsledný regulační děj metody čtvrtinového tlumení pro soustavu Beethoven – TUV	53
Obr. 2.19 – Přejchodová charakteristika $y(t)$ pro určení parametrů pomocí metody překmitu u soustavy Beethoven – TUV	54
Obr. 2.20 – Výsledný regulační děj metody překmitu pro soustavu Beethoven – TUV	55
Obr. 2.21 – Budova CP Čestlice	56
Obr. 2.22 – Technologické schéma vzduchotechniky v budově CP Čestlice.....	57
Obr. 2.23 – Výchozí nastavení regulace soustavy CP Čestlice – VZT	58
Obr. 2.24 – Přejchodová charakteristika $y(t)$ pro určení parametrů pomocí experimentální metody „pokus – omyl“ u soustavy CP Čestlice – VZT.....	59
Obr. 2.25 – Výsledný regulační děj experimentální metody „pokus – omyl“ pro soustavu CP Čestlice – VZT	60
Obr. 2.26 – Přejchodová charakteristika $y(t)$ pro určení parametrů pomocí metody čtvrtinového tlumení u soustavy CP Čestlice – VZT.....	61
Obr. 2.27 – Výsledný regulační děj metody čtvrtinového tlumení pro soustavu CP Čestlice – VZT.....	62
Obr. 2.28 – Přejchodová charakteristika $y(t)$ pro určení parametrů pomocí metody překmitu u soustavy CP Čestlice – VZT.....	63
Obr. 2.29 – Výsledný regulační děj metody překmitu pro soustavu CP Čestlice – VZT.....	64

SEZNAM TABULEK

Tab. 1.1 – Stavitelné parametry regulátoru pro metodu čtvrtinového tlumení (Vítečková, 2011).....	21
---	----

ÚVOD

Dnes už se nenajde nově postavená budova, velký průmyslový objekt až po menší rodinný dům, bez známky regulace. V oboru měření a regulace v oblasti vytápění a klimatizace se říká, že až 80 % regulačních smyček v této oblasti není nastaveno správně. Správným nastavením regulace soustavy se totiž může ušetřit jak energie, tak životnost technologie na dané soustavě.

Právě kvůli tomu se tématu kvalitnímu nastavení regulačních obvodů věnuje čím dál větší pozornost, protože v dnešní době se v průmyslu klade důraz na efektivní provoz z ekonomického a ekologického hlediska.

Proto je cílem této diplomové práce navrhnout postup pro návrh regulace systémů vytápění a klimatizace, který by zlepšil výsledný regulační pochod regulované veličiny na vybraných reálných soustavách.

1 TEORETICKÁ ČÁST

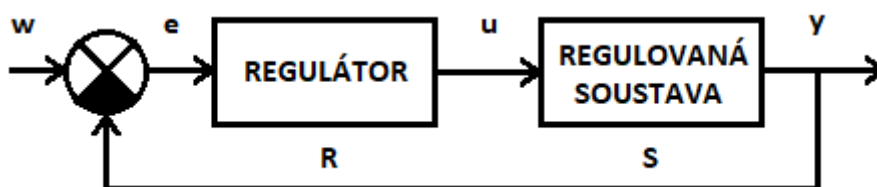
V této části bude uveden popis regulace a funkce PID regulátoru. Dále zde budou popsány používané metody regulace, nejdříve teoretické metody regulace bez znalosti modelu soustavy a poté pár příkladů postupů regulace z praxe. Také zde budou popsány typy regulovaných technologií, na co se připravit v praxi, a vnější vlivy působící na jednotlivé technologie.

1.1 REGULACE

V průmyslu se v dnešní době nejvíce využívá regulace pomocí PID regulátoru. Je to z důvodu její jednoduchosti a snadné implementaci do systému. Může se jednat o průmyslové PID regulátory, které už mají většinou svůj program pro automatický výpočet parametrů regulátoru nebo PLC, které obsahují SW dané soustavy s blokem PID regulátoru, kde musíme sami určit parametry regulátoru.

1.1.1 PID regulátor

PID regulátor nám slouží k řízení procesu bez nutnosti neustálého dohledu nebo ručního zásahu operátora. Regulátor nám periodicky vypočítává akční veličinu $u(t)$, která působí na soustavu tak, aby se regulovaná veličina $y(t)$ dostala na hodnotu žádané veličiny $w(t)$, kde t je čas. Regulátor spolu se soustavou tvoří regulační obvod, který vidíme na obr. 1.1.



Obr. 1.1 – Regulační obvod

Na vstup regulátoru je připojena regulační odchylka $e(t)$, která je rozdíl mezi žádanou hodnotou $w(t)$ a regulovanou veličinou $y(t)$, kde výpočet regulační odchylky $e(t)$ můžeme vyjádřit vztahem

$$e(t) = w(t) - y(t), \quad (1.1)$$

kde t je čas, s,

w – žádaná hodnota,

y – regulovaná veličina.

Nenulová regulační odchylka znamená buď poruchovou změnu regulované veličiny, nebo změnu žádané hodnoty. Podle regulační odchylky se nám poté mění akční veličina na výstupu regulátoru. Regulátor reaguje na vznik regulační odchylky podle proporcionálního, integračního a derivačního způsobu chování regulátoru. Výsledné chování regulátoru lze nastavit pomocí parametrů regulátoru, které má za úkol nastavit technik, který danou regulovanou soustavu oživuje. Parametry regulátoru se nejčastěji označují jako zesílení K , integrační časová konstanta T_I a derivační časová konstanta T_D .

1.1.2 Složky PID regulátoru

Regulátor se skládá z proporcionální složky P, která je řízena zesílením K , z integrační složky I, která je řízena integrační časovou konstantou T_I a z derivační složky D, která je řízena derivační časovou konstantou T_D . Jednotlivé složky PID regulátoru se sčítají ve výsledný akční zásah a dohromady ovlivňují průběh regulačního pochodu. Regulační pochod je také ovlivňován vlastnostmi regulované soustavy. Regulované soustavy v praxi mají většinou charakter dynamického systému prvního nebo druhého řádu, kde musíme počítat i s dopravním zpožděním.

Proporcionální složka

U proporcionálního chování je akční veličina úměrná regulační odchylce. Regulační odchylku vynásobíme zesílením K a vznikne nám vztah

$$u(t) = K \cdot e(t), \quad (1.2)$$

kde t je čas, s,

K – zesílení,

e – regulační odchylka.

Pokud použijeme pouze proporcionální složku regulátoru u soustav, kde se po akčním zásahu regulovaná veličina ustálí na nové konstantní hodnotě, tak nám v regulované soustavě vzniká trvalá regulační odchylka. Pro zmenšení regulační odchylky lze zvětšit zesílení K , ale může dojít k tzv. nestabilitě regulačního obvodu, kde může regulovaná veličina mít kmitavý

průběh nebo může regulovaná veličina narůst až do limitu akční veličiny. To může po delším časovém intervalu poškodit používané zařízení. Pro odstranění trvalé regulační odchylky lze přidat integrační složku regulátoru (Automa, 2003).

Integrační složka

U integračního chování po dobu existence regulační odchylky existuje i akční veličina podle vztahu

$$u(t) = u_0 + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(\tau) d\tau, \quad (1.3)$$

kde t je čas, s,

u_0 – akční veličina v čase $t = 0$,

T_I – integrační časová konstanta, s,

e – regulační odchylka,

τ – časová konstanta, s.

Pokud nám už proporcionální složka regulátoru nestačí a regulovaná veličina se nepřibližuje k požadované veličině, může nám pomoci s regulací regulované veličiny integrační složka regulátoru. Při velkém zvětšení podílu integrační složky může opět dojít až ke kmitavému regulačnímu pochodu. Toto kmitání lze zmenšit přidáním derivační složky regulátoru.

Vlivem integrační složky dochází k doplňkovému fázovému zpoždění. Tento fázový posun začíná hodnotou -90° a se zvětšováním úhlové frekvence signálu žádané veličiny se přibližuje k hodnotě 0° . Jako kompenzace proti doplňkovému fázovému zpoždění se také používá derivační složka regulátoru (Automa, 2003).

Derivační složka

U derivačního chování je akční veličina úměrná rychlosti změny regulační odchylky podle vztahu

$$u(t) = T_D \frac{de(t)}{dt}, \quad (1.4)$$

kde t je čas, s,

T_D – derivační časová konstanta, s.

Derivační složka nám pomáhá předem kompenzovat změny regulované veličiny a díky tomu je využívána pro tlumení překmitů regulovaného pochodu. V principu se jedná o to, že pokud změníme žádanou veličinu nebo regulovanou veličinu vlivem poruch a tato regulovaná veličina se začne přibližovat k nové hodnotě žádané veličiny, derivační složka regulátoru předem změní velikost zesílení opačným směrem od žádané hodnoty (Automa, 2003).

1.2 POUŽÍVANÉ POSTUPY REGULACE

Postupy regulace můžeme dělit na postupy teoretické a postupy praktické. Praktickými postupy je myšlena regulace podle zkušeností technika. V mém v případě byly vyzkoušeny teoretické postupy na reálných soustavách.

1.2.1 Teoretické postupy

Teoretických postupů regulace existuje celá řada. Každá metoda regulace je například použitelná jen na některý druh technologie. Teoretické metody se dělí na metody vyžadující model soustavy a na metody nevyžadující model soustavy. V této práci se zabývám metodami bez znalosti modelu soustavy. Pokud nemáme k dispozici model soustavy, musíme pracovat pouze s reálným regulátorem a reálnou soustavou. Tyto postupy se nejvíce využívají po rekonstrukci či opravě regulačního obvodu a nevyžadují téměř žádné znalosti o vlastnostech reálné soustavy. Mezi základní teoretické metody patří například experimentální metoda „pokus – omyl“, experimentální metoda kritických parametrů, metoda čtvrtinového tlumení, metoda dobrého zesílení a metoda překmitu.

Experimentální metoda „pokus-omyl“

Mezi první vybranou teoretickou metodu patří asi nejpoužívanější metoda v oboru MaR. Je to z důvodů, že je jednoduchá, rychlá a každý si tuto metodu může upravit podle svých potřeb. V teorii se objevuje tento postup, který je popsán v monografii (Vítečková, 2011).

Postup:

1. u regulačního obvodu soustavy se zkontroluje celé zapojení a ověří se funkčnost členů soustavy,

2. nastaví se požadovaná hodnota žádané veličiny $w(t)$ a v ručním režimu regulátoru se nastaví $y(t) \approx w(t)$, vyřadí se integrační složka T_I a derivační složka T_D , zesílení regulátoru K_P se sníží a regulátor se přepne do automatického režimu,
3. zesílení regulátoru K_P se postupně zvyšuje tak dlouho, až při skokové změně žádané veličiny $w(t)$ se dostane kmitavý průběh regulované veličiny $y(t)$ s požadovaným tlumením a možnou trvalou regulační odchylkou,
4. zesílení regulátoru K_P se sníží na 75–90 % předešlé hodnoty a pomalu se začne snižovat integrační časová konstanta T_I do té doby, než se odstraní případná trvalá regulační odchylka a získá se při skokové změně žádané veličiny $w(t)$ požadovaný průběh regulované veličiny $y(t)$. Rozumná hodnota integrační časové konstanty T_I je

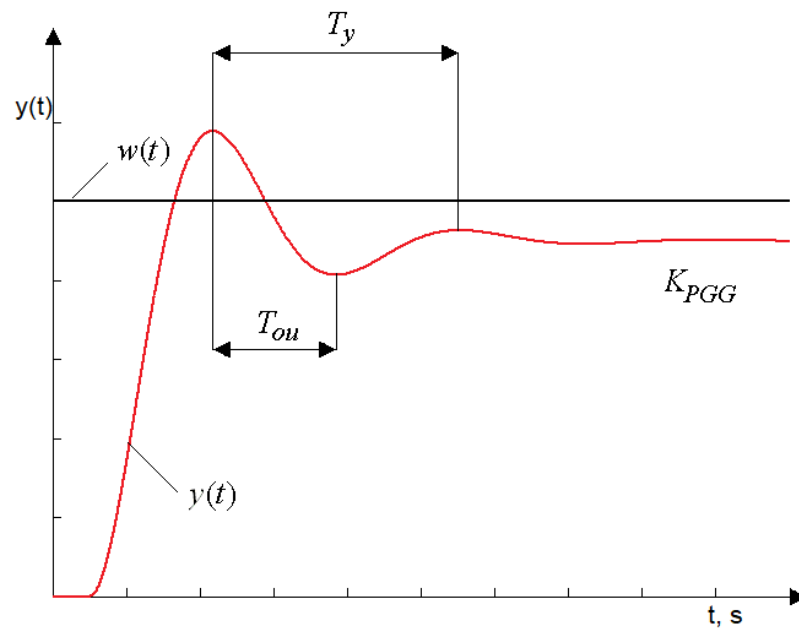
$$T_I = 0,67 \cdot T_y, \quad (1.5)$$

kde T_y je doba kmitu, s.

Doba kmitu je určena z průběhu regulované veličiny $y(t)$ získaného v bodě 3, který je vidět na obr. 1.2,

5. konečný požadovaný průběh regulované veličiny $y(t)$ se získá doladěním zesílení regulátoru K_P ,
6. v případě využití derivační složky se počáteční hodnota derivační časové konstanty T_D nastaví na hodnotu $0,1 \cdot T_I$. Pokud se nepříznivě projeví šumy nebo akční veličina $u(t)$ bude příliš aktivní, pak se derivační složka opět vyřadí. Pokud dojde ke zlepšení regulačního pochodu, hodnota derivační časové konstanty T_D se zvýší až na maximální hodnotu $0,25 \cdot T_I$, zesílení regulátoru K_P se zvýší přibližně o 25 % předešlé hodnoty

získané v bodě 5 a hodnota integrační časové konstanty T_I se sníží přibližně o 33 % předešlé hodnoty získané v bodě 4.



Obr. 1.2 – Seřízení pomocí experimentální metody „pokus – omyl“
(Vítečková, 2011)

Tento postup nám umožňuje experimentálně nastavit parametry regulátoru tak, aby se regulační obvod dostal na požadovanou hodnotu regulované veličiny $y(t)$ při skokové změně žádané veličiny $w(t)$ a poruchové veličiny $d(t)$, která působí na výstupu regulační soustavy. Skoková změna žádané hodnoty by neměla nikdy způsobovat nelineární chování, např. nasycení.

Metoda čtvrtinového tlumení

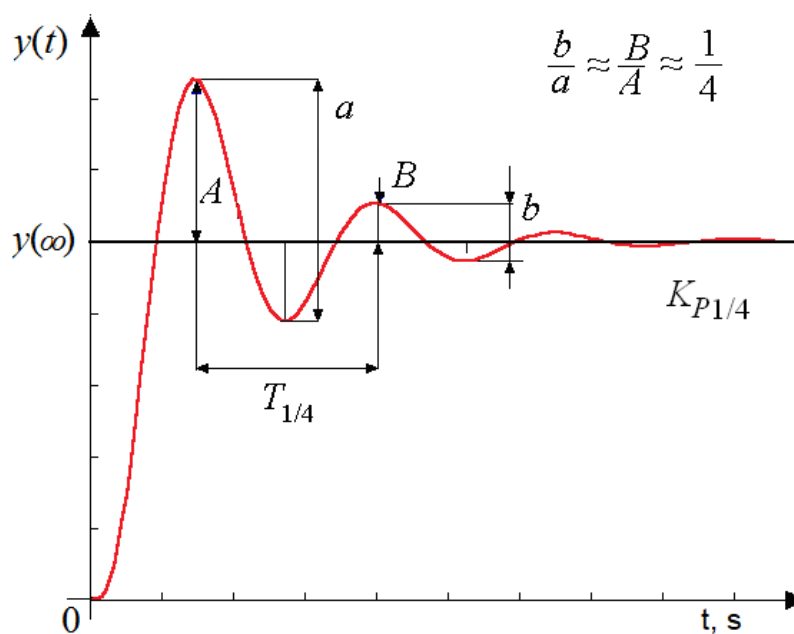
Tato metoda čtvrtinového tlumení je upravená Zieglerova-Nicholsova metoda kritických parametrů, která se liší tím, že není nutné rozkmitání regulačního průběhu soustavy. Tím pádem můžeme pracovat v lineární oblasti s více druhy regulovaných soustav bez obav z poškození zařízení. Postup je popsán v monografii (Vítečková, 2011).

Tab. 1.1 – Stavitelné parametry regulátoru pro metodu čtvrtinového tlumení (Vítečková, 2011)

Regulátor	K_P^*	T_I^*	T_D^*
P	$K_{P1/4}$	–	–
PI	$0,9K_{P1/4}$	$T_{1/4}$	–
PID	$1,2K_{P1/4}$	$0,6T_{1/4}$	$0,15T_{1/4}$

Postup:

1. stejný postup jako u experimentální metody „pokus – omyl“,
2. stejný postup jako u experimentální metody „pokus – omyl“,
3. zesílení regulátoru K_P se postupně zvyšuje tak dlouho, až při skokové změně žádané veličiny $w(t)$ se obdrží přechodová charakteristika regulačního obvodu $y(t)$ taková, aby podíl dvou po sobě následujících amplitud byl roven $1/4$, viz obr. 1.3,
4. z přechodové charakteristiky se následně odečte doba kmitu $T_{1/4}$ a z nastavení regulátoru jeho zesílení $K_{P1/4}$,
5. pro zvolený typ regulátoru se z tab. 1.1 určí hodnoty jeho stavitelných parametrů.



Obr. 1.3 – Seřizování podle metody čtvrtinového tlumení (Vítečková, 2011)

Metoda překmitu

Tato metoda byla původně navržena pro PI regulátor s proporcionální soustavou prvního řádu, ale později byla rozšířena i na jiné soustavy. Postup je z monografie (Vítečková, 2011).

Postup:

1. stejný postup jako u experimentální metody „pokus – omyl“,
2. stejný postup jako u experimentální metody „pokus – omyl“,
3. zesílení regulátoru K_P se postupně zvyšuje tak dlouho, až při skokové změně žádané veličiny $w(t) = w_0$ se obdrží přechodová charakteristika regulačního obvodu $y(t)$ taková, aby relativní překmit κ byl v rozmezí 0,1 – 0,6, viz obr. 1.4,
4. z průběhu regulované veličiny $y(t)$ se poté určí:
 - doba dosažení prvního maxima $y_m = y(t_m)$, tj. t_m ,
 - relativní překmit

$$\kappa = \frac{y_m - y(\infty)}{y(\infty)}, \quad (1.6)$$

kde y_m je maximum prvního kmitu regulované veličiny,
 $y(\infty)$ – hodnota ustálené regulační veličiny,

- zesílení otevřeného regulačního obvodu

$$k1KPO = \frac{b'}{1-b'}, b' = \frac{y(\infty)}{w_0}, \quad (1.7)$$

kde $y(\infty)$ – hodnota ustálené regulační veličiny,
 w_0 – žádaná hodnota,

5. vypočte se pomocný parametr

$$A' = 1,152\kappa^2 - 1,607\kappa + 1, \quad (1.8)$$

kde κ je relativní překmit,

poté se určí hodnoty stavitelných parametrů PI regulátoru

$$K_P^* = K_{PO} \frac{A'}{F}, \quad (1.9)$$

$$T_I^* = \min \left(0,86A't_m \frac{b'}{1-b'}; 2,44t_m F \right), \quad (1.10)$$

kde F je parametr seřízení,

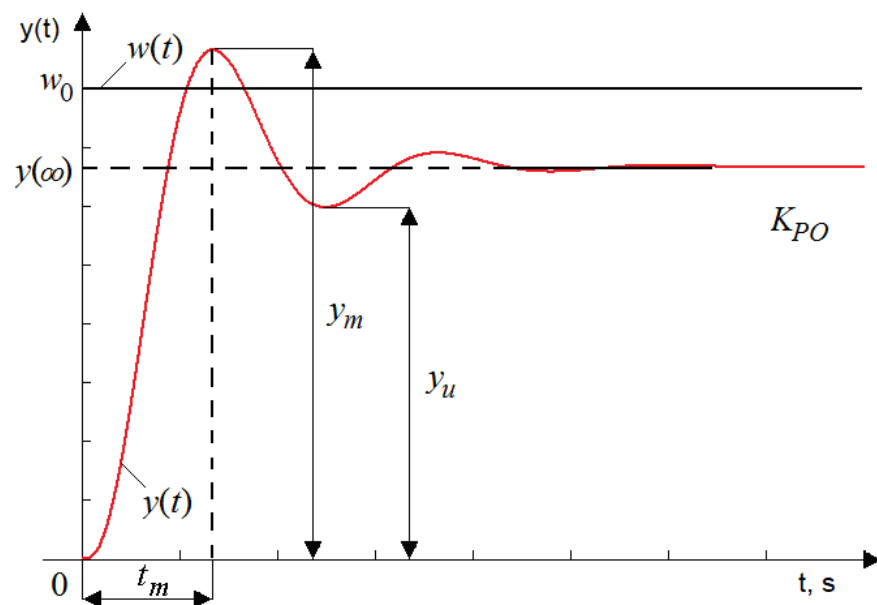
K_{PO} – zesílení otevřeného regulačního obvodu,

A' – pomocný parametr,

t_m – doba dosažení prvního maxima, s.

Parametr seřízení F můžeme nastavit pro:

- $F < 1$ rychlé, ale méně robustní,
- $F = 1$ rychlé a robustní (odpovídá metodě SIMC),
- $F > 1$ pomalejší, ale více robustní.



Obr. 1.4 – Seřizování podle metody překmitu

(Vítečková, 2011)

Pokud se nedaří ve 4. kroku určit $y(\infty)$ kvůli krátkému průběhu regulované veličiny $y(t)$, můžeme použít odhad

$$y(\infty) = 0,45(y_m + y_u), \quad (1.11)$$

kde y_m je maximum prvního kmitu regulované veličiny,

y_u – minimum prvního kmitu regulované veličiny.

1.2.2 Praktické postupy

Praktických postupů existuje celá řada, ale většinou jsou tyto postupy sepsané na konkrétní technologii. V této kapitole je sepsáno několik příkladů postupu regulace, který

využívají zkušenosti uvaďeči do provozu z rŕznŕch firem. Vŕtšinou se jednŕ o soustavy VZT a TUV.

Přříklad postupu regulace č. 1

- Oživení periferií 1:1 a prohlídka soustavy je základ. Mŕže se tam přijít na chyby v technologii, které je třeba odstranit předem nebo s nimi alespoň počítat (nevhodné umístění čidel, moc velká vzdálenost mezi ventilem a topným registrem, nevhodný pohon například termický ventil na VZT s venkovním vzduchem),
- výstupní signál z regulátoru (řídící veličina) se obvykle nastaví na 0 až 100 %. Odpovídá to otevření ventilu, klapky, požadavku na FM atd. Dimenzování (např. kolik m³/h dá ventilátor při FM na 100 %) zajišťuje dodavatel technologie,
- dočasne se vyloučí ostatní algoritmy, které by mohly mít na nastavování vliv (omezení teploty na přívodu VZT atd.),
- odhadne se, jak velký vliv na měřenou veličinu bude mít změna nastavení akčního členu (ventil, klapka, FM) z 0 na 100 % výstupního signálu,
- nastaví se proporcionální pásmo PI regulátoru a zkusí se spustit jednotka,
- pokud soustava kmitá, prodlouží se šířka pásma (obvykle na 1,5 až dvojnásobek), podle potřeby se opakuje,
- pokud soustava nekmitá, zkusí se zkrátit šířka pásma o 20 %,
- vždy se musí počkat dostatečně dlouhou dobu podle typu soustavy a hodnoty se sledují v online grafech, zkrácení se podle potřeby opakuje,
- jakmile se soustava zase rozkmitá, přidá se cca 10 % a ověří se, že nekmitá a proporcionální složku už se neřeší,
- P regulátor dosáhne přesné požadované hodnoty jen v jednom pracovním bodě, proto je nutné použít i integrační složku,
- integrační časová konstanta se nastaví odhadem tak, aby byla cca 10× delší než perioda kmitání změřená při předchozích pokusech, nebo empiricky u VZT na 120 s, u ÚT na 900 s,
- na výstupu PI regulátoru je vidět zvláště P a zvláště I příspěvek k výstupu, to je dobré sledovat i odděleně,
- další změny parametrů se snaží soustavu dostat do stavu, kdy je stabilní a skutečná teplota (nebo jiná veličina) se přesně dotáhne na požadovanou hodnotu,

- když se soustava ustálí, zkusí se provést skoková změna požadované hodnoty,
- poté se sleduje reakce, zda se soustava rozkmitá – pokud ano, zvětší se šířka pásma a obvykle i integrační konstanta,
- nakonec se nesmí zapomenout na dlouhodobou analýzu – kontrola historických dat (požadovaná hodnota, skutečná hodnota, provoz zařízení) řekněme po týdnu a podle potřeby se opakují kroky výše,
- u některých procesů (kaskádní regulace teploty, regulátor místnosti) je někdy lepší použít jen P regulátor, a integrační složku vyloučit.

Příklad postupu regulace č. 2

Co se týče konkrétně nových realizací různých prodejen, tak regulace ubývá a nahrazuje se spíše integrací cizích zařízení s vlastní regulací. Např. vzduchotechniky, dveřní clony, klimatizace, kotle a teď už i pohony na ventilech topení či klapkách. Místo regulace se tedy jen zadávají požadované hodnoty. Problém ale nastává v situaci, kdy zařízení, které má vlastní regulaci, a jsou mu jen posílány požadované hodnoty, reguluje špatně. Např. u kotle, kdy není schopen splnit posílaný požadavek (přetápí nebo cykluje vypnuto/zapnuto). V tomto případě se právě nabízí úprava parametrů v PI regulátoru, ke kterému ale nebývá přístup a ve většině případů ho nemá ani servisní technik onoho zařízení. Postup vypadá takto:

- po oživení (zapnutí napájení) rozvaděče se provede nastavení a adresace modulů a PLC, nastavení rozsahu měření I/O,
- kontrola periférií 1:1 – stav se sleduje na PC a operaci s periférií provádí montér takto:
 - odporové teploty zkratem nebo odpojením,
 - napět'ové měření odpojením nebo ovlivněním čidla,
 - u klapek a pohonů řízených napětím 0 až 10 V se provede kontrolní poloha 50 %, 100 % a zpět (pozor, některé pohony mají řízení 2 až 10 V),
 - čidla úniku plynů se testují většinou kontrolním plynem, který je přibalen u čidla, nebo mají kontrolní tlačítko, stejně jako u čidel zámrazu na topných registrech VZT,
 - diferenční čidla tlaku u VZT na signalizaci zanešených filtrů nebo chodu ventilátorů (nastavení difference dle parametrů VZT),
- po kontrole všech periférií a návazností se nahraje SW do PLC a postupně se nastavuje a spouští technologie do provozního standardu,

- u regulačních prvků se sleduje aktuální stav, zadávají změny požadovaných hodnot a sledují reakce regulátoru, tím se např. simuluje přechod z režimu komfort/útlum, kdy dochází ke skokové změně požadavku, kde může dojít k rozkmitání regulace. Pokud se nechají přednastavené parametry PI regulátoru $T_I = 120$ s a $X_P = 30$ a pokud je problém s regulací, mění se integrační časová konstanta T_I , případně proporcionální pásmo X_P s nějakým časem cca 15 až 20 minut pro ustálení regulace. Pokud je s regulací větší problém a je nutná přesná regulace, může to být otázka třeba i několik hodin a je dobré mít k dispozici data z historie,
- výhodou je také vzdálený přístup na PLC, pak se dá ladění provádět v klidu od stolu, kdy se změny parametry v PI regulátoru, nechají se v trendu zobrazit hodnoty (požadovaná veličina, regulovaná veličina a akční veličina) a mezitím se může dělat jiná práce,
- aby fungovala dobře regulace např. u topení, je důležité, aby byl dobře vyvážený systém po hydraulické stránce, tedy aby měli topenáři správně nastaveny regulátory průtoku a vlastně i aby to bylo dobře projektově navrženo,
- důležité je také období, ve kterém se ladí regulace. Těžko se reguluje topení v létě a chlazení zase naopak v zimě.

Příklad postupu regulace č. 3

- Jako první se na stavbě najde PLC. Nastaví se IP adresa, nahraje SW a nastaví vstupy. Nejdříve se pustí PLC jen do stavu komunikace a dále se zkouší periferie. Nejlépe se začíná teplotami, tlakem, digitálními vstupy atd.,
- u prvků, které vyžadují PI regulaci se zjistí, mezi jakými procenty se bude regulace pohybovat. Většinou 0 až 100 %, ale např. u kondenzačních kotlů se dá setkat i s 20 až 100 %. Pokles napětí na 0 V totiž vypíná kotle, což není pro životnost kotlů ideální je často vypínat. Minimální hodnota pro spuštění jsou 2 V,
- u dalšího postupu je důležitý čas a ideální vzdálený přístup. Zde se využívá postup pokus – omyl,
- nejprve se odhadne vliv akčního členu bez časové složky,
- poté podle výsledku se pásmo proporcionality X_P zkracuje nebo zvětšuje,
- jakmile složka P odpovídá požadavkům, zkusí se ještě pohnout s offsetem,

- to samé se provede i s I složkou. Tady jde zejména o to, jak rychlá má být regulace soustavy,
- poté se ještě vyzkouší změnit požadavky na regulaci. Změní se požadovaná teplota na kotli, uzavřou se větve v systému, aby se změnil tlak a zase se několik minut čeká, jak na to bude PI regulace reagovat. Jde hlavně o to, aby po prvním kmitu výstupní hodnota nevrstla o více jak $\pm 10\%$ veličiny. Ideální je, aby se například napětí za těch 10 minut nezměnilo o více než $\pm 5\text{ V}$. To samé platí i o ovládané veličině, např. u kotlů výstupní teplota,
- někdy je regulace poměrně jednoduchá, ale poté se ještě třeba měsíc sleduje ve vizualizačním systému SCADA, zda se neprojeví nějaké výkyvy. Pokud nastane taková situace, nechá se online sledování třeba i 30 až 45 minut a sledují se v grafu veškeré změny hodnot, které by na regulaci mohly mít vliv. To se poté dá použít na simulaci a následnému vyladění i v nepříznivých podmínkách,

Příklad postupu regulace č. 4

- Detekce PLC a dalších připojených modulů,
- kontrola všech I/O 1:1,
- nahrání a spuštění s výchozími hodnotami. Zde se většinou používají hodnoty osvědčené z předchozích projektů, případně pokud se jedná o nějakou novou technologii, tak se nechá nastavení parametrů PI regulátoru ve výchozím stavu (tj. $T_I = 120\text{ s}$, $X_P = 30$). Záleží také o jakou technologii se jedná. Jelikož v našem oboru se většinou nejedná o rychlé děje, osvědčilo se i prvotní nastavení $T_I = 300\text{ s}$ a $X_P = 30$. Na úkor rychlosti akčního zásahu se tak dá vyhnout většímu kmitání a pozvolna se dojde k lepšímu ustálení na požadované hodnotě. Příklad nastavených výchozích hodnot:
 - ekvitermní regulace – $T_I = 120\text{ s}$, $X_P = 30$,
 - regulace teploty u VZT – $T_I = 300\text{ s}$, $X_P = 30$,
 - regulace výkonu ventilátorů VZT dle konstantního tlaku (průtoku) – $T_I = 120\text{ s}$, $X_P = 3500$,
 - ostatní – $T_I = 120\text{ s}$, $X_P = 30$ nebo $T_I = 300\text{ s}$, $X_P = 30$ (dle požadavku na rychlost děje),
- následuje regulace parametrů, pokud na místě není vzdálený přístup, je zapotřebí toto udělat na místě. Požadované hodnoty se dají do grafu například v Merbon IDE a nechají cca 1 h běžet (někdy stačí méně, záleží na četnosti děje) a na základě trendů se upraví

parametry PI regulátoru. Zrychlit, zpomalit na základě toho, zda měřená hodnota kmitá kolem požadované, jestli se k ní vůbec dostane, případně za jak dlouho se ustálí na požadované hodnotě. Po změně parametrů je potřeba znova sledovat trendy, jestli změnou parametrů došlo ke zlepšení. Tento postup se opakuje, dokud není výsledek regulace vyhovující. Vzhledem k časovému presu přímo na místě stavby, ne vždy je možnost regulovat ideálně,

- v ideálním případě je na místě vzdálený přístup a k tomu ještě SCADA případně Webserver s možností zobrazení historických dat v trendech. V tom případě je možné nechat běžet soustavu s výchozími hodnotami např. do druhého dne a posléze parametry upravovat na základě historických dat vzdáleně,
- ve většině případů se mění pouze parametr integrační časové konstanty T_I . Většinou dochází ke kmitání měřené hodnoty kolem požadované hodnoty, tím pádem se zvětšuje integrační časová konstanta T_I (zpomaluje se přechodný děj) a tím se kmitání omezí a zlepší se ustálení na požadované hodnotě. V ideálním případě by se časem měla měřená hodnota ustálit přesně na požadované hodnotě. K tomu však v reálu téměř nikdy nedojde. Snažíme se tomu však v rámci možností přiblížit,
- opakování těchto úprav se dělá tak dlouho, dokud není výsledek dostačující, respektive dokud se nesplní požadavek na regulaci, který by měl být uveden v technické zprávě. Např. regulace přívodního vzduchu je $\pm 0,5$ °C od požadované hodnoty a tohoto se snaží dosáhnout,

Příklad postupu regulace č. 5

- Zadání požadovaných vlastností systému a provozních režimů zadavatelem. Ve většině případech není zadavatel schopen předem určit všechny parametry, a tak se technické zprávy řeší dle historických zkušeností, které mnohdy nejsou použitelné,
- při měření skutečných hodnot fyzikálních veličin vždy zohlednit setrvačnost, jak s ohledem na setrvačnost čidel teploty či prostoru samotného, tak na dopravní zpoždění měřeného média. Například měření teploty klimatu v botanické zahradě vyžadovalo měření v několika sekcích skleníku a měřené hodnoty se musí zprůměrovat, a navíc vyloučit z průměru extrémní odchylky z důvodu oslunění čidla. Historická budova divadla s několika balkóny takřka neumožňuje objektivně změřit teplotu prostoru,

- změny požadované teploty např. přepnutí režimů komfort/pokles vnáší do soustavy šok, na který musí soustava reagovat a najít nový rovnovážný stav,
- u servopohonů se musí posoudit rychlost přestavení z 0 až 100 % v závislosti na předpokládané rychlosti soustavy. Např. řízení teploty na průtokovém ohřevu TV, kde jsou kladeny vysoké nároky na rychlost soustavy. Součástí soustavy je samozřejmě i akční člen. U řízení otáček ventilátorů pomocí FM je nutno kontrolovat nastavení náběžných nebo sestupných ramp u samotného měniče (pozor na proudová omezení při rychlosti změn),
- nastavení regulace PI(D) regulátorů u topných okruhů se vždy začíná s hodnotami, které jsou nastaveny jako výchozí hodnoty ($X_P = 30-40$, $T_I = 100$ až 120 s). Obvykle tyto hodnoty v těchto rozsazích vyhovují jak pro rychlost dosažení požadované teploty, tak regulační odchylky ve stabilizovaném stavu, která nepřesahuje několik desetin °C. U jednotek VZT se nastaví obvykle ($X_P = 40$ až 50 , $T_I = 200$ až 1000 s). Zde je třeba odladit řízení ohřevu, kde je žádaná teplota prostoru nikoli v kanálu a řízení teploty vratné vody z důvodu ochrany proti zamrazení, aby nedocházelo ke kolizi požadavků na ohřev. V klasickém případě se musí začít vždy od začátku. Vypne se integrační složka ($T_I = 0$ s) a ladí se pouze proporcionální zesílení (šířka pásma X_P). Ideál je, když se regulovaná veličina přiblíží žádané veličině, eventuálně mírně překmitne. Potom se proporcionální zesílení trochu potlačí (šířka pásma X_P se zvětší). Teď nastává okamžik pro ladění integrační časové konstanty T_I , aby rychlost dotažení regulované veličiny na požadovanou veličinu byla optimální a odchylky byly v rámci tolerance. Na stavbě není čas na velké vymýšlení, proto se začíná s osvědčenými hodnotami,
- odladění regulace se provádí v etapě topné (funkční) zkoušky a ve zkušebním provozu (topná sezóna) se provádí kontrola nastavení PI regulace. Vždy je výhodné použít systém, kde se mohou zaznamenat historická data a ty poté vyhodnotit, zda regulace splňuje požadovaná kritéria. Využití vzdáleného přístupu a logování dat je ideálním řešením. Během první topné sezóny se poté nastavuje ekvitermní křivka. U objektů s vertikální topnou soustavou je to velmi obtížný úkol,
- ke sledování kvality regulace se využívá možnost Webserverů nebo u velkých celků systém SCADA. Těmito systémy lze nejen odladit regulaci, ale i identifikovat ostatní problémy topných soustav.

Příklad postupu regulace č. 6

- Když je rozvaděč vyrobený, už je hotový aplikační software pro PLC i s grafickým rozhraním pro displej. Na dílně se provádí prvotní zkoušky rozvaděče, kontrola zdrojů, konfigurace PLC, oživení displeje s uživatelským rozhraním. Vyzkouší se povely v PLC na výstupní svorky. Tyto operace ušetří na stavbě hodně času,
- po instalaci rozvaděče na stavbě a zapojení čidel a pohonů by měla následovat kontrola 1:1. Běžně se postupuje, že se při „běžícím“ PLC odpojují již zapojené kabely čidel a na monitoru PLC se kontroluje, jestli se jedná o správnou pozici. Tento postup je neekonomický, protože se provádí již jednou provedená činnost. Kabely na pozicích čidel se zapojují až při oživování a s „běžícím“ PLC včetně grafického terminálu. Po zapojení konkrétního čidla se okamžitě zobrazí hodnota jak v monitoru PLC, tak i na grafickém terminálu. Tímto způsobem se zapojí všechna čidla teplot, tlaků a ostatní snímače. Pokud se jedná o aktivní snímače, musí mít při zapojování vypnutou pojistku,
- kontrola výstupních obvodů se již provádí klasickým způsobem, připojení napájení, povel a vizuální kontrola pohonu, čerpadla apod.,
- vlastní spuštění okruhů probíhá postupně, jeden po druhém. Jelikož u systému Domat Control System se využívají vlastní knihovny, které se po další a další instalaci zdokonalují, spuštění probíhá s již odladěnými výchozími hodnotami regulátorů PI. Na řízené proměnné se nechává cca 30 min online graf, aby bylo vidět, jak se systém chová. Pokud regulační smyčka nemá tendenci se stabilizovat, upraví se nejdříve integrační časová konstanta T_I a pak až následně pásmo proporcionality X_P ,
- v praxi odladění jednoho okruhu trvá od 5 min do 30 min. Při použití online grafů se lze věnovat několika okruhům najednou,
- někdy se stává, že je potřeba rychle nadefinovat regulační smyčku PI, potom se využívají předdefinované parametry výrobce. Když je technologie správně navržena (ventily, čerpadla, dimenze potrubí), většinou není třeba nic měnit,
- jako poslední úkon při oživování je kontrola havarijních stavů.

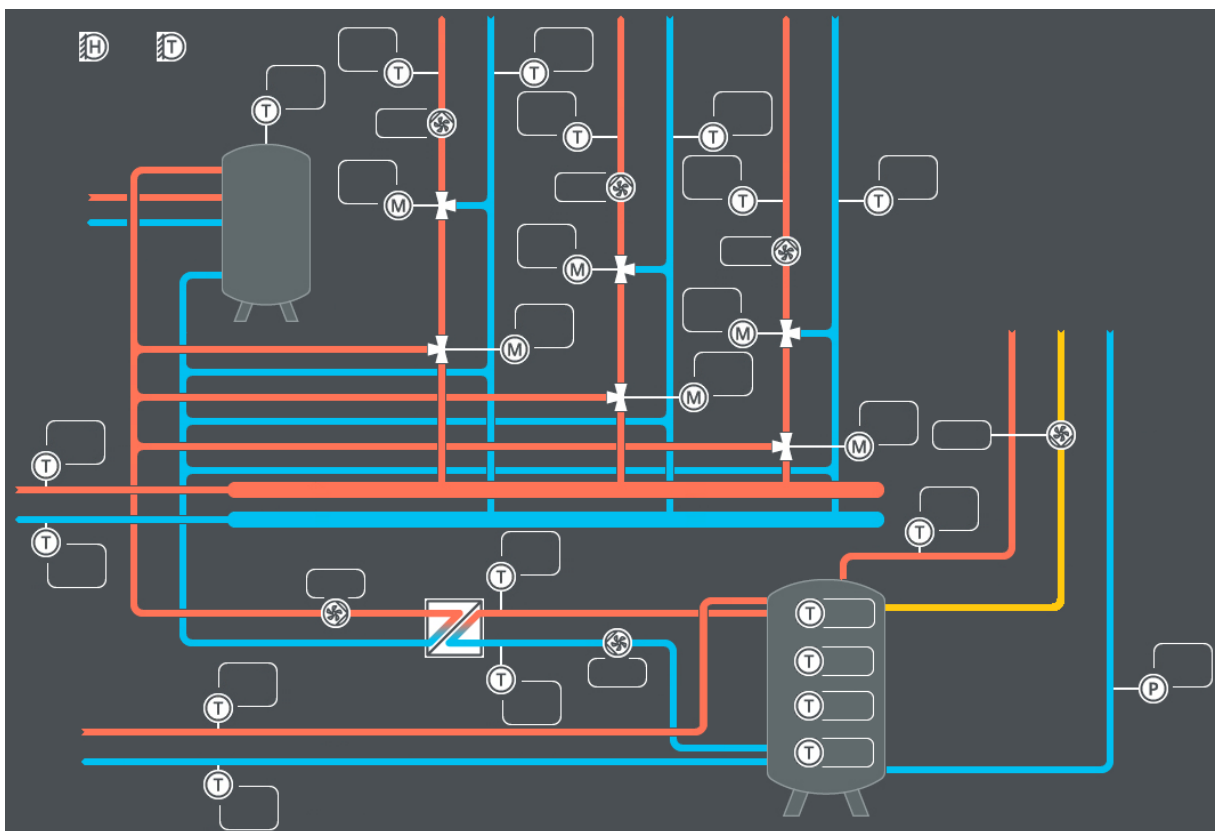
1.3 TYPY REGULOVANÝCH TECHNOLOGIÍ

V této kapitole jsou popsány jednotlivé typy používaných regulovaných technologií jako je například topný okruh, výměník, kaskáda kotlů, VZT jednotka s přívodní i odtahovou

regulací a zónová regulace. Také zde jsou popsány rozdíly mezi jednotlivými regulovanými technologiemi a na co si dát pozor při jejich regulaci.

1.3.1 Topný okruh

Topný okruh je soustava větví zajišťující teplou vodu pro ÚT, TUV, podlahové topení nebo VZT. Teplá voda nám vstupuje do větví buď z horkovodu nebo ze zásobníku teplé vody. Teplota vody na výstupu z větví se poté reguluje pomocí ventilů, které jsou ovládány z výstupů PI regulátorů a pomocí oběhových čerpadel. Příklad topného okruhu můžeme vidět na obr. 1.5.

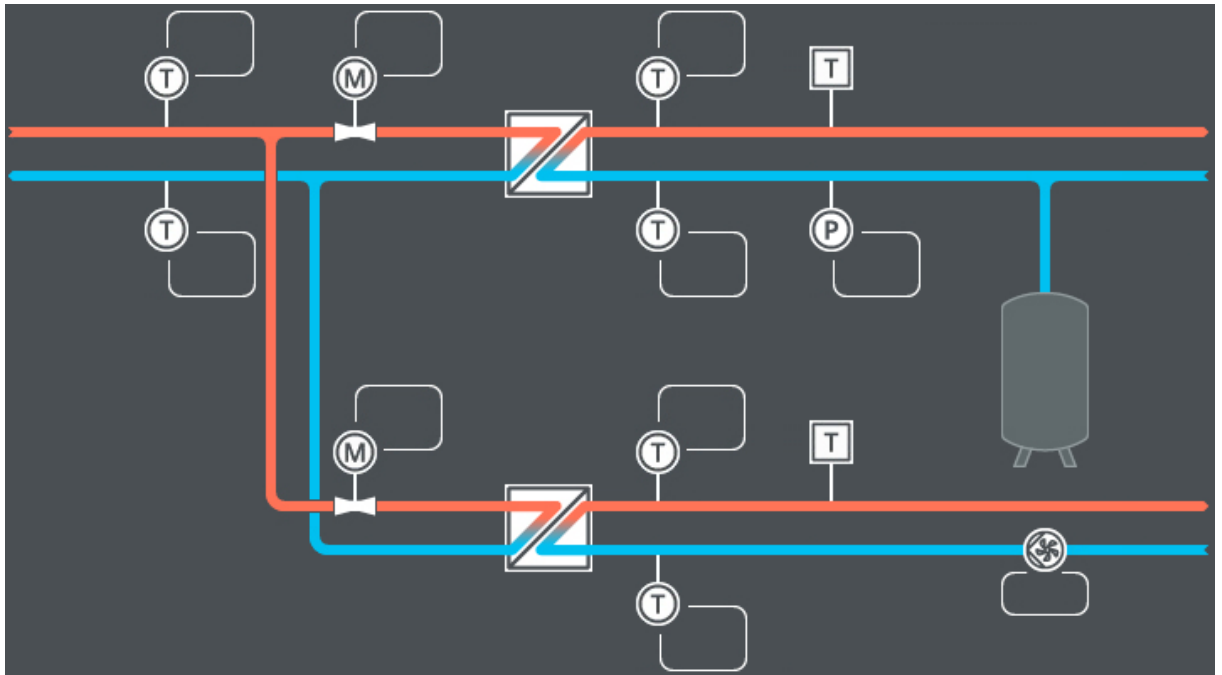


Obr. 1.5 – Topný okruh

Patří mezi nejméně kritické regulované technologie z důvodu pomalé reakce soustavy, u které nevádí překmitnutí regulačního průběhu. Následuje zónová regulace v místnostech, která teplotu v místnostech ustálí.

1.3.2 Výměník

Tepelný výměník slouží pro převod tepla z horkovodu, ve kterém protéká voda o teplotě okolo 100 °C, do topného okruhu, který, jak už je popsáno v kapitole 1.3.1, slouží k ohřevu vody ve větvích pro ÚT, VZT nebo TUV. Na obr. 1.6 můžeme vidět dva tepelné výměníky, kde zrovna v tomto případě jeden slouží pro ohřev vody ÚT a druhý pro ohřev TUV.



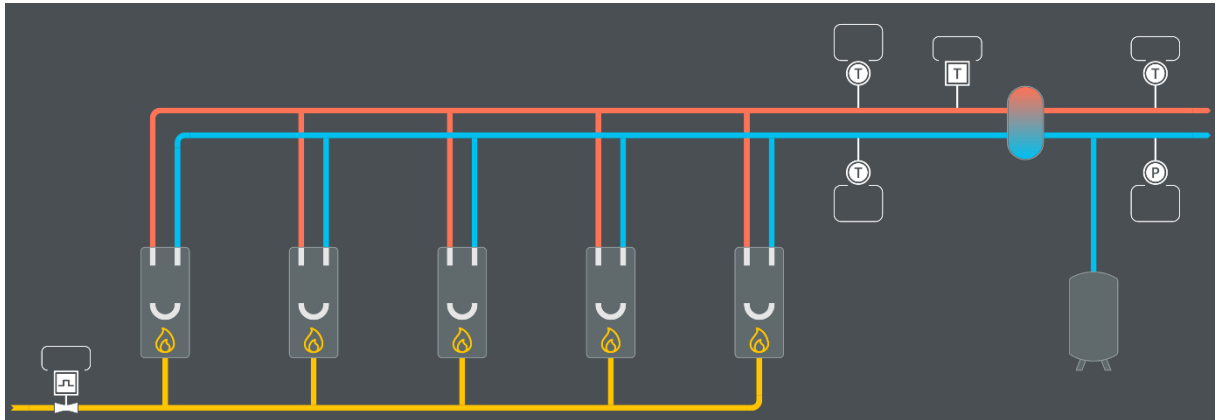
Obr. 1.6 – Tepelné výměníky

Asi nejkritičtější regulovaná technologie, protože překmit regulačního průběhu vede k přetopení výměníku a následnému alarmu soustavy. U zaplavovaných parních výměníků hrozí vypuštění kondenzátu a přetopení. Často se zde objevují předimenzované ventily, u kterých je obtížná regulace malých výkonů. Také se zde občas vyskytují zásadní chyby v hydronice, kdy jsou např. poddimenzovaná nebo zcela chybějící oběhová čerpadla na sekundárním okruhu.

1.3.3 Kaskáda kotlů

Kaskádové zapojení kotlů je dnes ve většině nových realizací, protože je výhodné hned z několika různých důvodů. Prvním z nich je modulace, kdy kotle umí pracovat s výkonem od 10 %. To se vyplácí hlavně v létě, kdy je potřeba ohřívat pouze teplou vodu, nikoli vodu pro vytápění. Dalším důvodem je zastupitelnost jednotlivých kotlů, kdy při odstávce jednoho

z kotlů může jeho činnost zastoupit kterýkoliv jiný kotel. Také může sloužit jeden kotel pro ohřev teplé vody a ostatní pro vytápění. Díky kaskádovému zapojení mají kotle i delší životnost. Příklad kaskádového zapojení kotlů můžeme vidět na obr. 1.7.

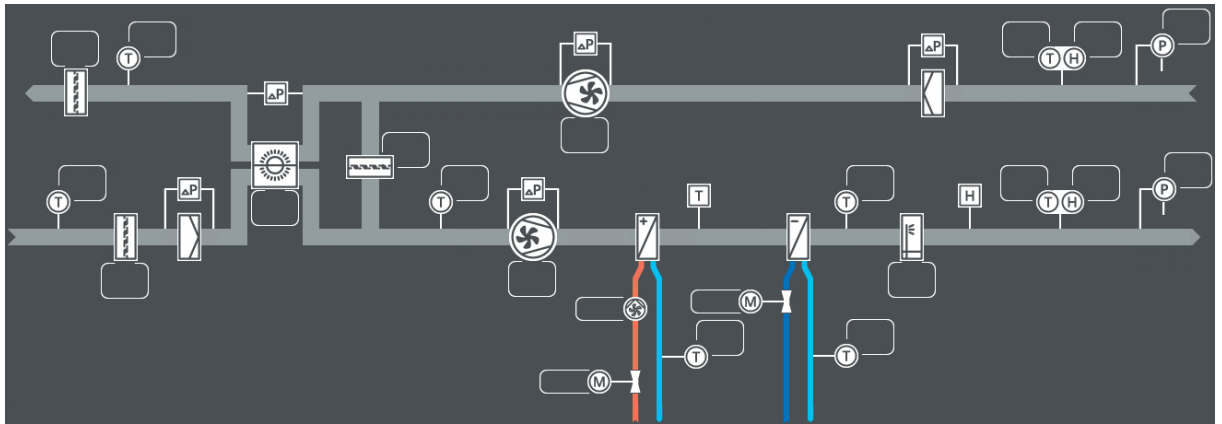


Obr. 1.7 – Kaskáda kotlů

V dnešní době regulaci řeší často dodavatelé kotlů svými vlastními regulátory, MaR pouze zadává požadovanou výstupní teplotu vody nebo výkon. To je ideální stav. Pokud však regulátory nefungují tak, jak by měly, musí se respektovat jmenovité výkony kotlů a měly by se provozovat po maximální dobu s takovým výkonem, při kterém je maximální účinnost.

1.3.4 VZT jednotka s přívodní i odtahovou regulací

Klasické technologické schéma vzduchotechnické jednotky je vidět na obr. 1.8, kde přívodní venkovní vzduch jde přes filtr a dále je vtahován ventilátorem na ohřívač vzduchu a chladičí jednotku. Za těmito jednotkami je snímána teplota a vlhkost vzduchu. V případě nízké vlhkosti vzduchu se zde nachází ještě zvlhčovač a takto upravený vzduch poté vstupuje do místnosti. Na odtahu vzduchotechnické jednotky se nachází opět filtr, který je důležitý například hlavně v kuchyních restaurací pro ochranu odtahového ventilátoru z důvodu mastného odtahového vzduchu. V případě, že nasávaný přívodní vzduch je studený, může se využít rekuperační jednotky, která funguje jako tepelný výměník, kde odtahovaný teplý vzduch ohřívá rekuperační jednotku a ta poté ohřívá přívodní studený vzduch. Ve většině VZT funguje i cirkulace vzduchu, pokud je splněno hygienické minimum.

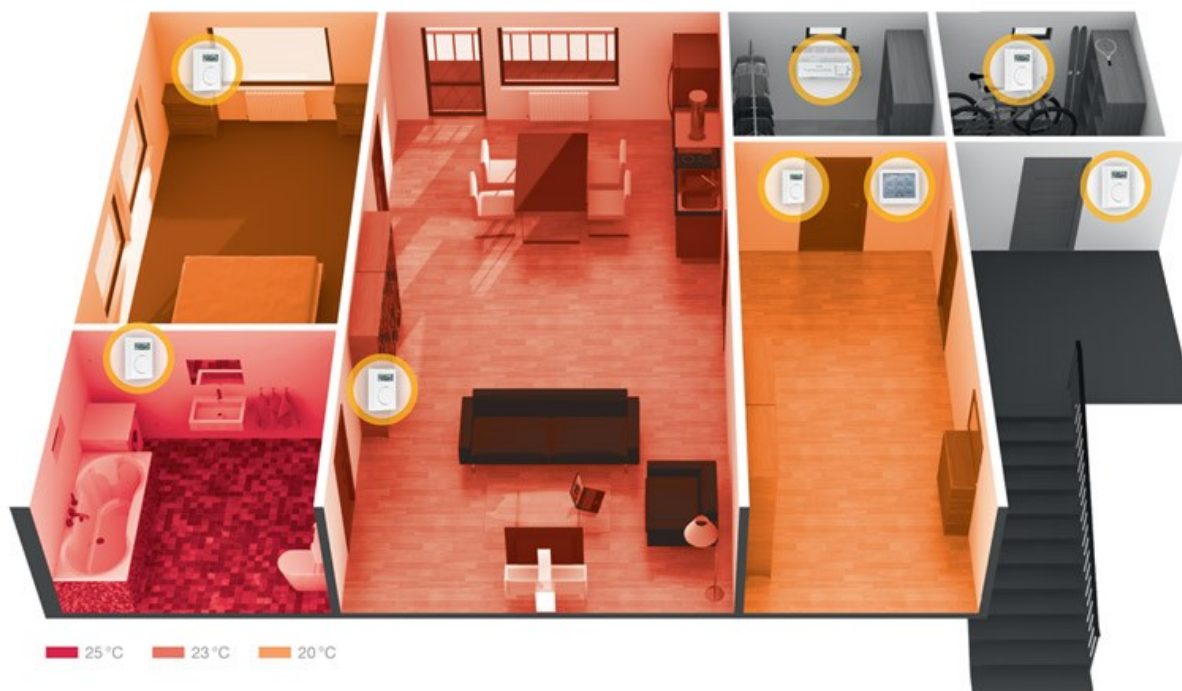


Obr. 1.8 – Vzduchotechnická jednotka

Jednoduchá regulace na přívod nebo kaskádní regulace na místnost (odtah) je nejčastější typ regulovaného okruhu. Zásadní vliv má konstrukce VZT, umístění čidel, hydraulické řešení ohřevu či chlazení a ochrana proti zámraze.

1.3.5 Zónová regulace

Zónová regulace je z regulačního hlediska jednoduchý typ regulace topení s možnou úsporou energie. Tímto druhem regulace jde regulovat několik místností najednou. Základním prvkem jsou pokojové termostaty, u kterých se dá nastavit topný režim v časovém programu, kdy pro úsporu energie je přes den režim komfort a přes noc režim útlum. Dalším prvkem pro úsporu energie mohou být venkovní žaluzie, které regulují svit slunce do místností a tím mohou zamezit zbytečnému požadavku regulátoru na topení či chlazení. Příklad, jak jsou obvykle jednotlivé místnosti vytápěny, je vidět na obr. 1.9.



Obr. 1.9 – Zónová regulace (Jablotron, 2013)

Zónová regulace má bezprostřední vliv na uživatelský komfort. Problém tedy může vzniknout při chybném dimenzování technologie, kdy je nedostatečný topný nebo chladicí výkon zařízení. Dále může vzniknout problém při nemožnosti spojitě regulace, kdy jsou chladicí splitové jednotky předimenzované s možností pouze vypnuto/zapnuto. Také zde často vzniká problém při špatném umístění čidla teploty v místnosti, kdy je senzor ovlivňován parazitním teplem/chladem (okno, odpadní teplo ledničky) nebo naopak izolován od měřeného prostředí (instalace za závěsem nebo v koutě).

1.4 IDEÁLNÍ SYSTÉM VERSUS REALITA

Většina soustav pro regulaci v praxi se mnohonásobně liší oproti soustavám, které byly měřeny například v laboratořích. V laboratořích bylo počítáno s nějakou jednou možnou chybou vstupující do systému. V praxi těchto vstupujících chyb do systému může být více. Například dopravní zpoždění, nelinearita nebo špatné dimenzování prvků.

1.4.1 Dopravní zpoždění

V oboru měření a regulace u otopných soustav se s dopravním zpožděním musí vždycky počítat. Můžeme se s ním setkat u:

- ventilu s motorovým pohonem (až 120 s),
- termického ventilu (až minuty),
- délky potrubí mezi ventilem a registrem (rychlost vody 1 m/s),
- u VZT vzdáleností mezi registrem a čidlem teploty,
- tepelné kapacity prvků (potrubí, registr) – setrvačnost (soustava vyššího řádu).

1.4.2 Nelinearita

Nelinearitou můžeme myslet i dopravní zpoždění nebo měnící se venkovní teplotu. Zde se jedná o nelinearity způsobené:

- čidla (pokud jsou provozovány například jen dolních 10 % rozsahu),
- ventily (výběr vhodné charakteristiky – lineární, procentní nebo logaritmická),
- výměníkem u VZT nebo VS zejména zaplavovaným,
- soustavy při různých zátěžích.

1.4.3 Dimenzování prvků

Dimenzování prvků je velmi důležité a musí být provedeno už na začátku realizace projektu projektantem. Problém vzniká u:

- ventilů, kdy projektant raději vybere ventil s o číslo větší dimenzí, tím ale způsobí, že regulace se pohybuje třeba jen v dolních 30 % rozsahu,
- podobně může toto platit i pro zvlhčovače atd.

1.5 VNĚJŠÍ VLIVY

Při regulaci soustav hrají velkou roli vnější vlivy, které na soustavu působí. Zde byly uvedeny příklady na dvou hlavních soustavách a popsány kritické vnější vlivy působící na tyto soustavy.

1.5.1 VZT – venkovní teplota, teplota vody rozdělovače

Venkovní teplota má zásadní vliv, určuje charakteristiku přenosu tepla z vody na vzduch. U jednotek s rekuperací je čidlo teploty za rekuperátorem (před registrem ohřevu) jen výjimečně, takže teplotu vzduchu vstupujícího do registru neznáme. Venkovní teplota je měřena centrálně na jednom místě, většinou u kotelny nebo výměňkové stanice, málokdy jsou instalována čidla na sání u každé vzduchotechnické jednotky. S těmito teplotami tedy nemůžeme moc počítat, možná jen orientačně pro nějakou korekci P a I parametrů podle venkovní teploty.

Teplota vody rozdělovače funguje podobně jako venkovní teplota. Teplota rozdělovače bývá regulována ekvitermní regulací, aby pomohla sekundárním okruhům (ekvitermním větvím). Takže i zde je nutné počítat s proměnnou teplotou vody vstupující do regulačního ventilu. V přechodném období (jaro, podzim) může teplota vody klesnout ze zimních cca 80 °C třeba na 60 °C.

1.5.2 ÚT – teplota vody rozdělovače, teplota v místnostech

Teplota vody v rozdělovači viz kapitola 1.5.1. Tam, kde není na rozdělovači větev VZT, se teplota výstupní vody z kotlů udržuje cca 5 až 10 °C nad maximálním požadavkem z topných větví, tím se usnadní práce regulačním ekvitermním okruhům.

Teplota v místnostech je ovlivňována tepelnými zisky a ztrátami z oken, technologií, osobami a dalšími zdroji. Jde o vysoce proměnlivou veličinu s masivním vlivem okolí (např. oslunění oken).

2 PRAKTICKÁ ČÁST

V této části budou popsány reálné soustavy, jak vypadají jejich technologická schémata a výchozí nastavení regulace. Poté na těchto soustavách budou vyzkoušeny 3 teoretické metody popsané v kapitole 1.2.1. Nakonec bude navržen postup regulace v pár základních krocích.

2.1 REÁLNÉ SOUSTAVY

Pro měření na reálných soustavách byla využita možnost měřit na soustavě vzduchotechniky a výměňkové stanici pro ohřev teplé užitkové vody v administrativní budově Beethoven. Pro přehlednost budou tyto soustavy nazývány Beethoven – VZT a Beethoven – TUV, kdy se podle aktuální normy místo TUV používá PWH (Potable Water Hot), ale v praxi je stále obvyklejší termín TUV. Jako třetí soustava je k dispozici soustava vzduchotechniky v budově CP Čestlice.

2.1.1 Beethoven – VZT

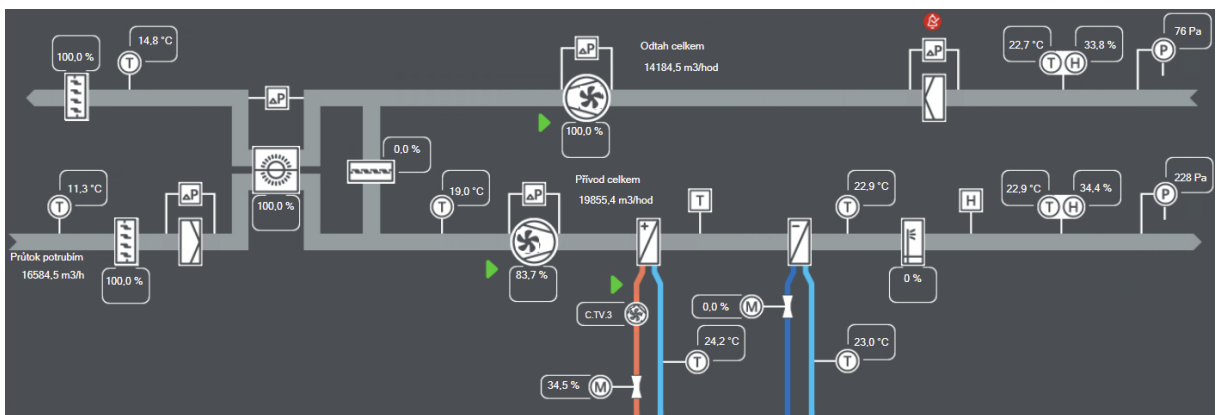
Administrativní budova Beethoven na obr. 2.1 byla postavena roku 2019 a nachází se na Praze 9. V této budově bude řešena regulace teploty přívodu ze vzduchotechniky v kancelářích jednoho patra.



Obr. 2.1 – Administrativní budova Beethoven

Technologické schéma

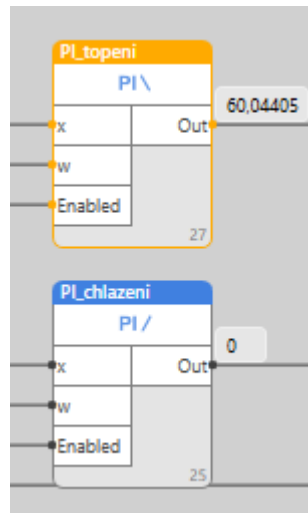
Technologické schéma vzduchotechniky můžeme vidět na obr. 2.2. Venkovní vzduch je nasáván přes filtr do vzduchotechniky, kde se vzduch podle teploty na přívodu do kanceláří přes ohřivač/chladič, buď zahřívá, nebo chladí. V mém případě byl řešen ohřev přívodního vzduchu, protože většina měření proběhla ve večerních hodinách při venkovní teplotě okolo 10 °C. Tento ohřev vzduchu se dá ovlivnit zvýšením průtoku teplé vody přes ohřivač. Průtok nám ovlivňuje čerpadlo a ventil, který se otevírá podle výstupu z PI regulátoru. Odtahem jde teplý odpadní vzduch a byla by škoda ho nevyužít, proto se zde nachází rekuperační jednotka, která funguje jako výměník a teplý odpadní vzduch ohřívá studenější přívodní vzduch a tím vrací část energie zpět do systému. Případně můžeme využít klapky před rekuperační jednotkou, která při otevření propojí přívod a odtah a odpadní vzduch může zpětně cirkulovat. Musí být však dodržena dostatečná kvalita vzduchu neboli hygienické minimum. Případnou nízkou vlhkost můžeme zvětšit zvlhčovačem umístěným u přívodu do kanceláří.



Obr. 2.2 – Technologické schéma soustavy Beethoven – VZT

Výchozí nastavení

Program, který se stará o regulaci teploty, se skládá ze dvou PI regulátorů. Jeden PI regulátor slouží pro ohřev přívodního vzduchu a druhý PI regulátor se stará o chlazení přívodního vzduchu. V programu je můžeme vidět ve formě bloku na obr. 2.3.



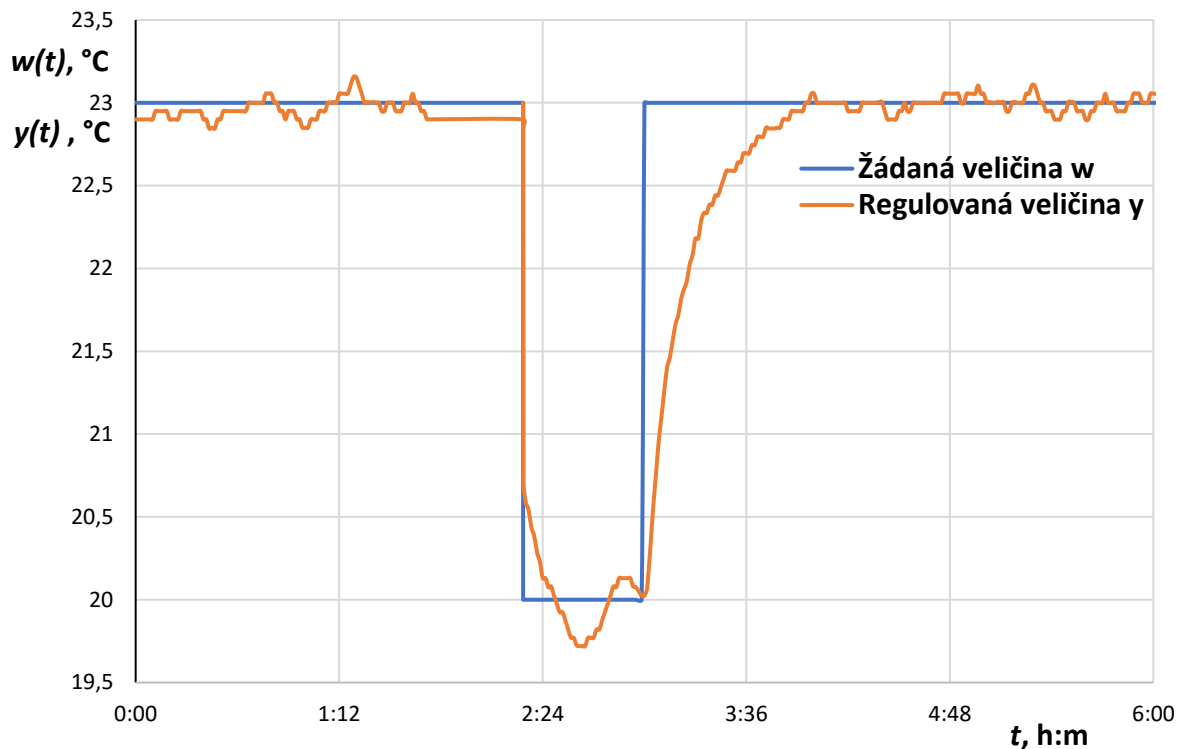
Obr. 2.3 – Blok PI regulátoru

Každý z regulátorů má většinou jiné parametry zesílení, integrační časové konstanty a požadované teploty. V tomto případě se regulátory liší pouze požadovanou teplotou, kde u PI regulátoru pro chlazení je nastavena požadovaná teplota na 24 °C a u PI regulátoru pro ohřev je nastavena požadovaná teplota na 23 °C. Zesílení a integrační časová konstanta je v obou případech nastavena stejně. Jak můžeme vidět na obr. 2.4, proporcionální pásmo je nastaveno na hodnotu $X_p = 30$ a integrační časová konstanta na hodnotu $T_i = 300$ s. V Merbon IDE se u regulátoru uvádí mezi parametry místo zesílení proporcionální pásmo. Pro přehlednost bude použito v praktické části zesílení z důvodu popisu jednotlivých metod v teoretické části, kde se hovoří o zesílení, a ne o proporcionálním pásmu. Minimum a maximum výstupu z regulátoru je omezeno na 0 až 100 %, které nám poté ovládá polohu ventilu na přívodu do ohříváče.

Max	100	real
Min	0	real
Off	0	real
Ti	300	real
w	23	real
x	22,895	real
Xp	30	real

Obr. 2.4 – Vlastnosti bloku PI regulátoru

Pro prvotní měření na soustavě bylo nutné připojit se dálkově na administrativní budovu Beethoven přes firemní VPN síť. Ladění soustavy bylo ovládáno přes Merbon IDE, kde byla požadovaná teplota nejdříve nastavena směrem dolů na 20 °C a poté skokovou změnou požadované teploty na 23 °C. Průběh regulace byl sledován přes vizualizační webové rozhraní Merbon SCADA, kde byl výsledný regulační průběh převeden do XLSX souboru neboli Excelu. V Excelu byly hodnoty zobrazeny v grafu, který můžete vidět na obr. 2.5.



Obr. 2.5 – Výchozí nastavení regulace soustavy Beethoven – VZT

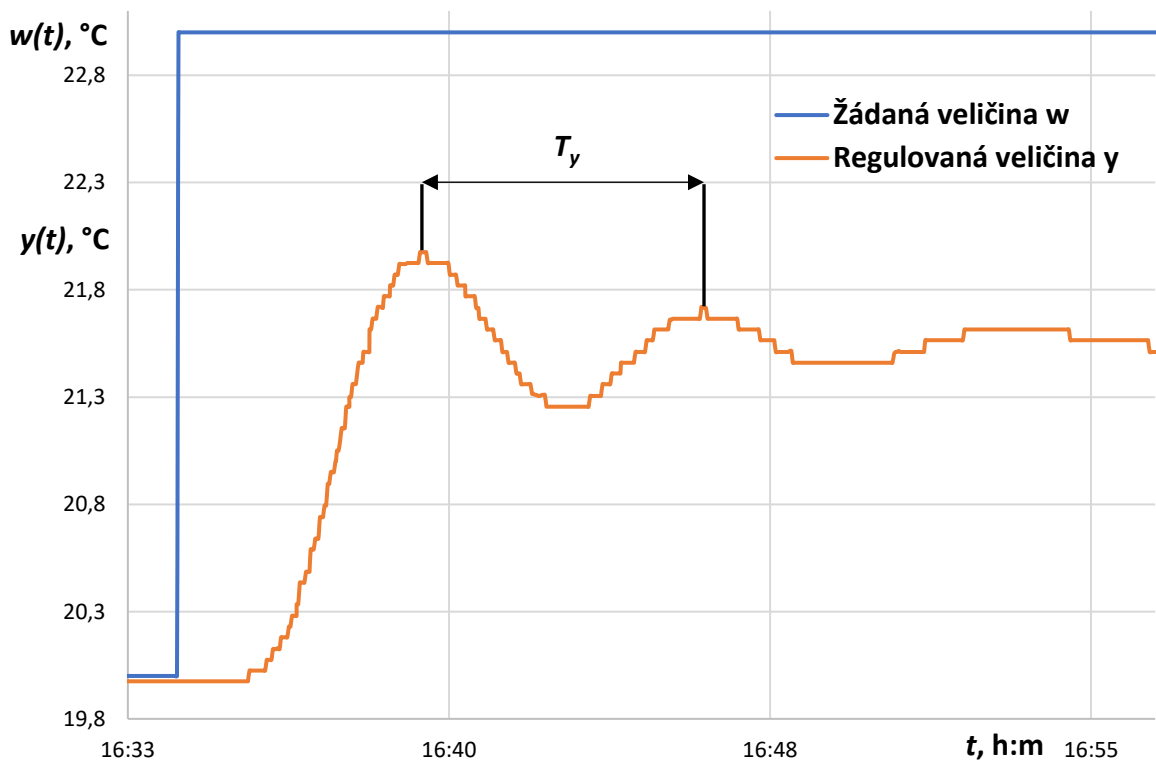
Měření probíhalo při večerních teplotách okolo 10 °C. Při změně požadované teploty z 23 °C na 20 °C je vidět rychlý spád díky nízké venkovní teplotě. Je vidět, že regulovaná veličina by se ještě chvíli pohybovala okolo požadované teploty 20 °C, než by se ustálila. Zde jde ale o regulaci teploty, která je v systému trvale nastavena na 23 °C. Regulace z teploty 20 °C na požadovanou teplotu 23 °C trvala přibližně 40 minut a je vidět pozvolný regulační průběh bez výrazného překmitu.

Nastavení pomocí metody „pokus-omyl“

Postupně bylo postupováno podle kroků popsaných v teoretické části. Nejprve s kontrolou zapojení a funkčnosti jednotlivých členů přes Merbon SCADA.

Poté byla teplota ustálena na 20 °C. Integroční časová konstanta byla vyřazena, derivační složka se zde nepoužívá, zesílení bylo sníženo a požadovaná teplota nastavena na 23 °C.

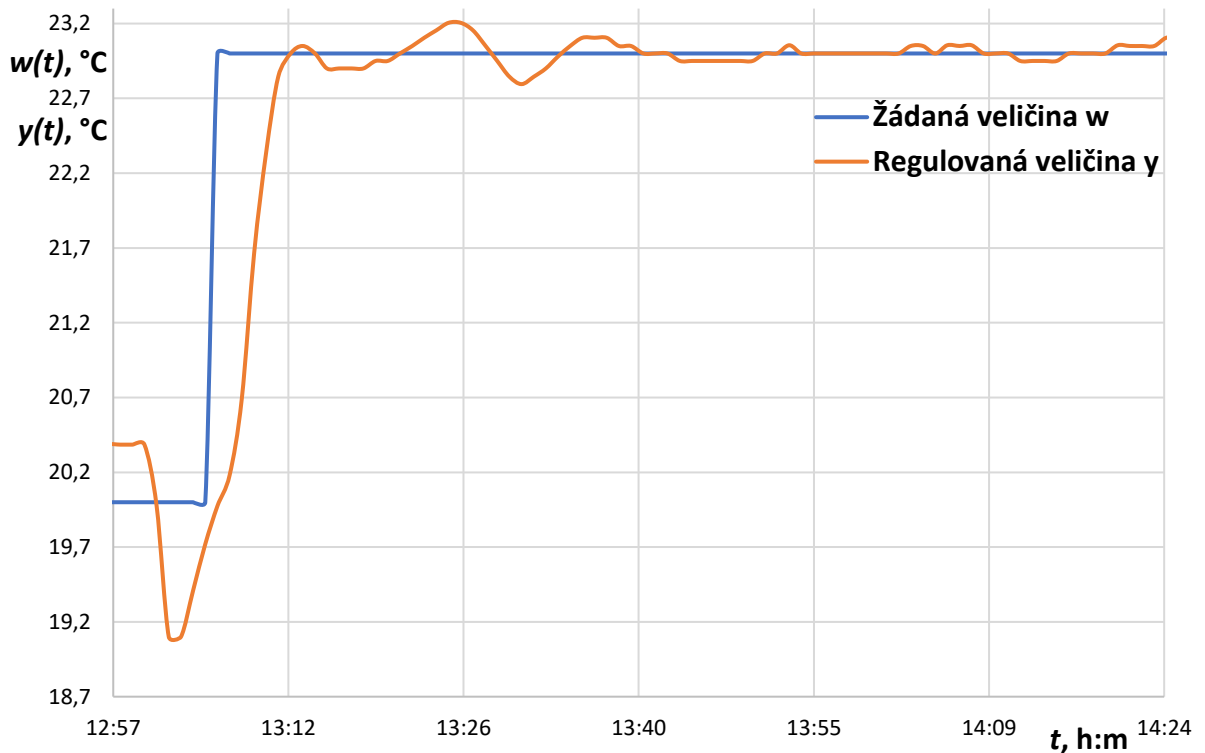
Zesílení bylo nastaveno tak, aby regulační průběh regulované veličiny vyšel alespoň podobně s průběhem regulační veličiny popsaným v teoretické části práce. Jak je vidět na obr. 2.6, tak bez integrační časové konstanty soustava s tímto zesílením nedokáže dostat požadovanou teplotu až na běžně používaných 23 °C.



Obr. 2.6 – Přejchodová charakteristika $y(t)$ pro určení parametrů pomocí experimentální metody „pokus – omyl“ u soustavy Beethoven – VZT

Následně byla z charakteristiky regulačního průběhu odečtena doba kmitu T_y , ze které se vypočítá parametr integrační časové konstanty, kde rozumná hodnota integrační časové konstanty se udává 67 % z doby kmitu T_y . Po výpočtu vyšla integrační časová konstanta s hodnotou $T_I = 261$ s. Zesílení se mělo snížit na 75-90 % původní hodnoty. Kvůli

nedostatečnému zesílení soustavy při měření první charakteristiky regulačního průběhu bylo zesílení rovnou ponecháno na 90 % původní hodnoty zesílení, tedy $K_P = 30$.



Obr. 2.7 – Výsledný regulační děj experimentální metody „pokus – omyl“ pro soustavu Beethoven – VZT

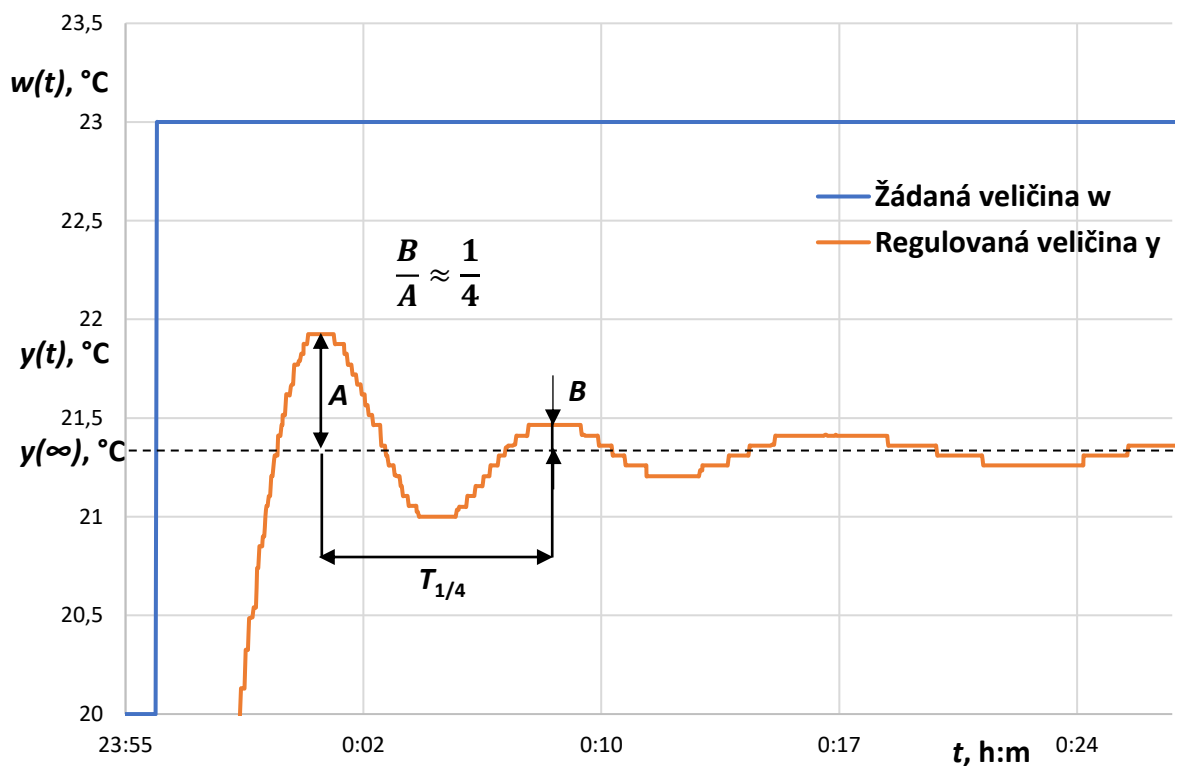
Vypočítané parametry byly nastaveny do vlastností PI regulátoru a poté byla vyzkoušena skoková změna z 20 °C na požadovanou hodnotu 23 °C. Regulační změny na obr. 2.7 trvala přibližně 6 minut, což může být počítáno za velmi rychlý regulační pochod, a to bez většího překmitu regulované veličiny. Regulační průběh se během jedné hodiny vychýlil maximálně o 0,2 °C.

Nastavení pomocí metody čtvrtinového tlumení

První dva kroky této metody popsané v kapitole 1.2.1 jsou stejné jako u předchozí experimentální metody „pokus – omyl“ s tím, že byla přeskočena kontrola zapojení a funkčnost členů soustavy přes Merbon SCADA, protože kontrola už byla provedena.

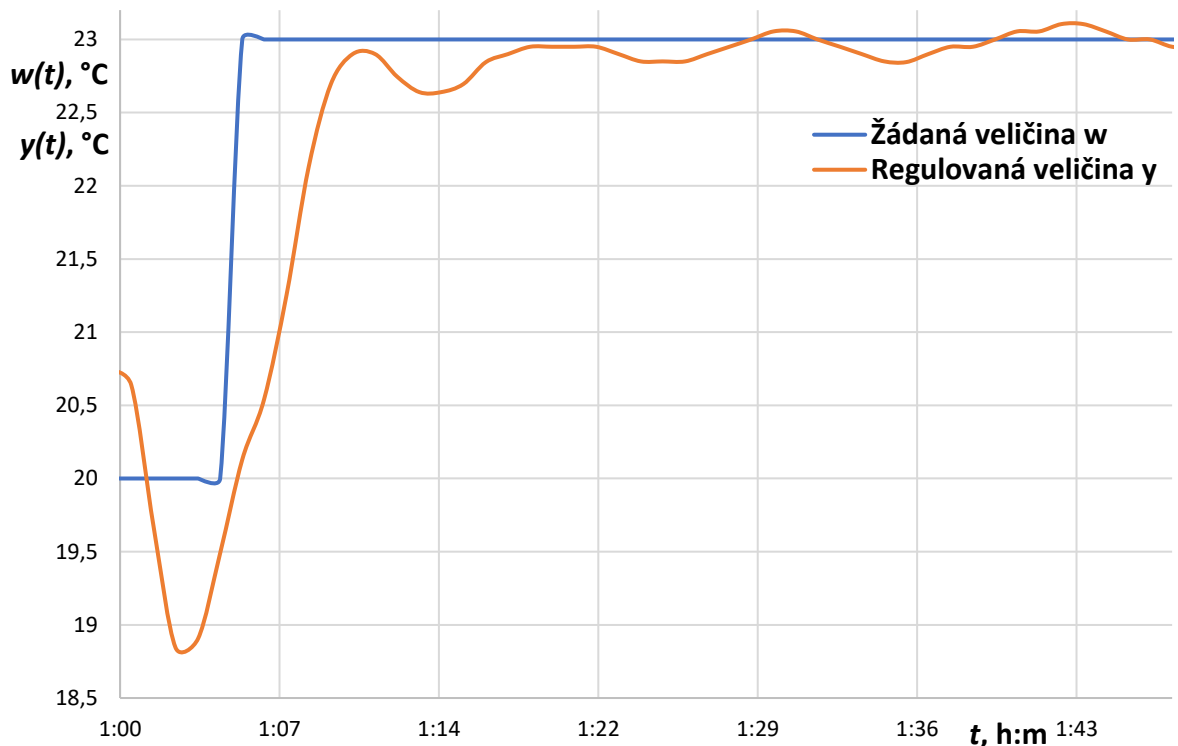
Dále byla nastavena žádaná veličina $w(t)$ na 20 °C, vyřazena integrační časová konstanta T_I a sníženo zesílení K_P .

V dalším kroku byla provedena skoková změna z teploty 20 °C na teplotu 23 °C a zvyšováno zesílení K_P tak dlouho, dokud nebylo dosaženo takové přechodové charakteristiky, aby podíl dvou po sobě jdoucích amplitud byl roven 1/4, neboli útlum = 4. Takovou přechodovou charakteristiku můžeme vidět na obr. 2.8.



Obr. 2.8 – Přechodová charakteristika $y(t)$ pro určení parametrů pomocí metody čtvrtinového tlumení u soustavy Beethoven – VZT

Z přechodové charakteristiky byla odečtena doba kmitu $T_{1/4} = 420$ s a z vlastností regulátoru nastavené zesílení $K_{P1/4} = 25$. Díky těmto hodnotám bylo možné z tab. 1.1 vypočítat stavitelné parametry PI regulátoru, kdy pro PI regulátor platí pro integrační časovou konstantu $T_I = T_{1/4} = 420$ s a zesílení $K_P = 0,9 \cdot K_{P1/4} = 22,5$.



Obr. 2.9 – Výsledný regulační děj metody čtvrtinového tlumení pro soustavu Beethoven – VZT

Po nastavení parametrů do PI regulátoru byla provedena skoková změna z 20 °C na požadovaných 23 °C. Regulační pochod této skokové změny na obr. 2.9 trval přibližně 6 minut bez překmitu regulované veličiny. Až na první odchylku o 0,35 °C se během hodiny držela regulovaná veličina stabilně na požadované veličině 23 °C s odchylkou maximálně 0,15 °C.

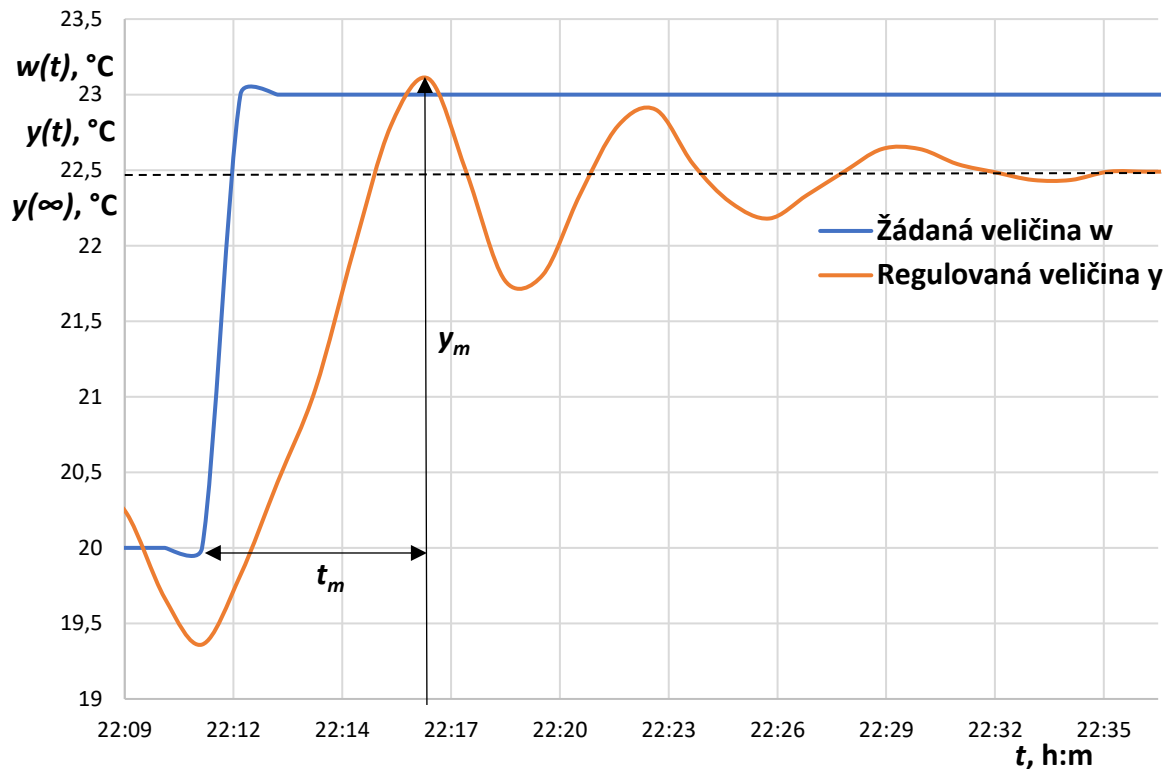
Nastavení pomocí metody překmitu

První dva kroky jsou stejné jako u předchozích dvou metod, tudíž byl první krok, kontrola zapojení a funkčnost členů soustavy přes Merbon SCADA, opět přeskočen.

V druhém kroku byla nastavena žádaná veličina $w(t)$ na 20 °C, vyřazena integrační časová konstanta T_I a sníženo zesílení K_P .

V dalším kroku bylo zvyšováno zesílení K_P tak, aby bylo dosaženo takové přechodové charakteristiky, aby relativní překmit κ byl v rozmezí 0,1 až 0,6. Takového rozmezí se nepodařilo dosáhnout. Hodnota relativního překmitu se dostala na hodnotu okolo 0,026, kdy

byl regulační obvod okolo této hodnoty citlivý na zesílení. Po přidání ještě většího zesílení už byl regulační průběh značně kmitavý. Přechodovou charakteristiku můžeme vidět na obr. 2.10.



Obr. 2.10 – Přechodová charakteristika $y(t)$ pro určení parametrů pomocí metody překmitu u soustavy Beethoven – VZT

Z průběhu regulované veličiny bylo poté určeno:

- doba dosažení prvního maxima $t_m = 300$ s,
- relativní překmit $\kappa = \frac{y_m - y(\infty)}{y(\infty)} = 0,03$
- zesílení otevřeného regulačního obvodu

$$k_{1KPO} = \frac{b'}{1-b'} = 45, b' = \frac{y(\infty)}{w_0} = 0,98.$$

Dále byl vypočten pomocný parametr

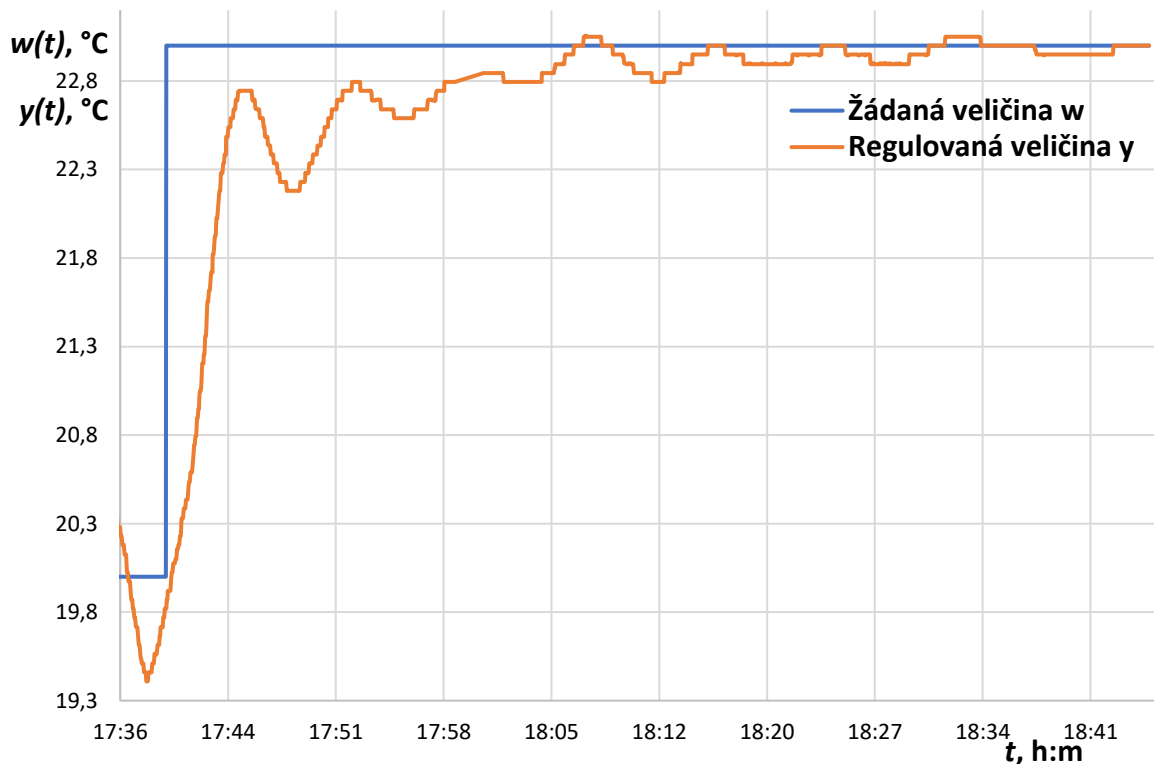
$$A' = 1,152\kappa^2 - 1,607\kappa + 1 = 0,96$$

a pak určeny hodnoty stavitelných parametrů PI regulátoru

$$K_P^* = K_{PO} \frac{A'}{F} = 43,$$

$$T_I^* = \min\left(0,86A't_m \frac{b'}{1-b'}; 2,44t_m F\right) = 732$$
 s,

kde F je parametr pro seřízení soustavy. Tento parametr byl nastaven pro rychlý, ale robustní přechodový děj neboli $F = 1$.



Obr. 2.11 – Výsledný regulační děj metody překmitu pro soustavu Beethoven – VZT

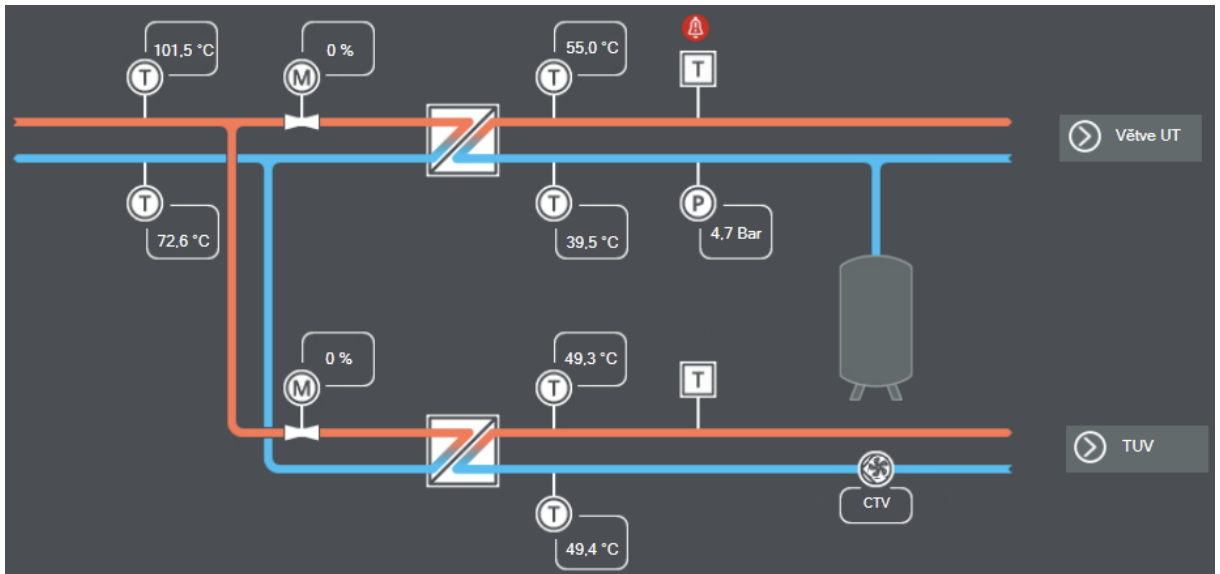
Určené parametry byly nastaveny do PI regulátoru, poté byla provedena skoková změna z 20 °C na požadovaných 23 °C a sledován regulační pochod. Už na první pohled na obr. 2.11 je zde vidět, že zde je buď velká derivační časová konstanta nebo malé zesílení. Jelikož derivační konstanta u těchto pomalých soustav není používána, tak je zde menší zesílení, než by mohlo být. Většinou za uspokojivou regulaci bývá považován průběh regulované veličiny pohybující se $\pm 5\%$ okolo požadované teploty. Tím pádem by mohla regulace trvat přibližně 5 minut, ale regulace vypadala lépe až od 2. kmitu ve 12. minutě regulace, kde už se regulovaná veličina držela stabilněji okolo požadované hodnoty.

2.1.2 Beethoven – TUV

Tato soustava se nachází ve stejné budově jako předešlá soustava, a to v administrativní budově Beethoven. Zde je řešen ohřev TUV neboli teplé užitkové vody.

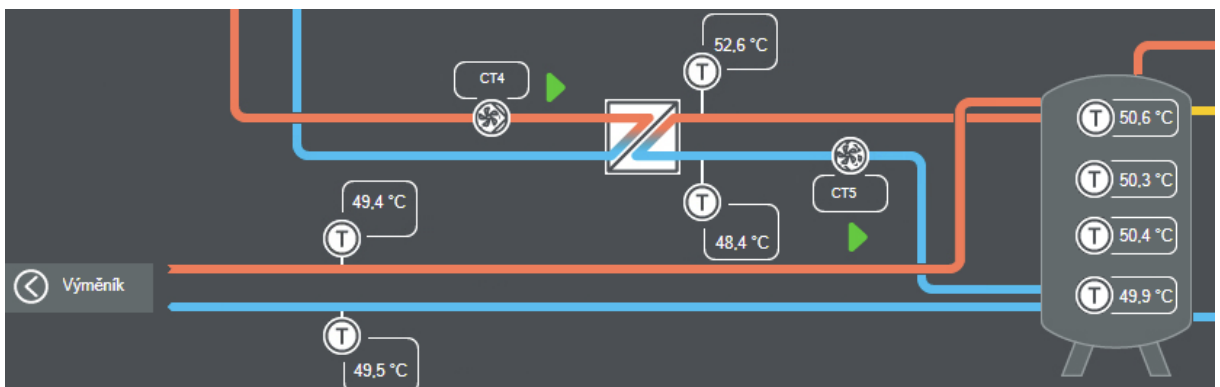
Technologické schéma

Technologické schéma můžeme vidět na obr. 2.12. Na přívodu máme teplou vodu z horkovodu, která se pohybuje okolo 100 °C a větví se do dvou okruhů. Zde jsou dálkově ovládané ventily, ze kterých vede teplá voda z horkovodu dále do tepelných výměníků. Jeden okruh vede do větví ÚT. Druhý okruh vede do zásobníku teplé užitkové vody. Za tepelnými výměníky jsou dále čidla teploty a senzor přetopení tepelného výměníku.



Obr. 2.12 – Technologické schéma soustavy Beethoven – TUV

TUV se nahřeje nejprve zásobníkem odpadního tepla na obr. 2.13. Pokud tento zdroj nestačí a rozdíl teplot není dostatečný, tak se použije ohřev pomocí horkovodu. Ohřev začíná, až teplota v horní části zásobníku klesne pod požadovanou teplotu a skončí, až teplota ve středu zásobníku bude na požadované teplotě.

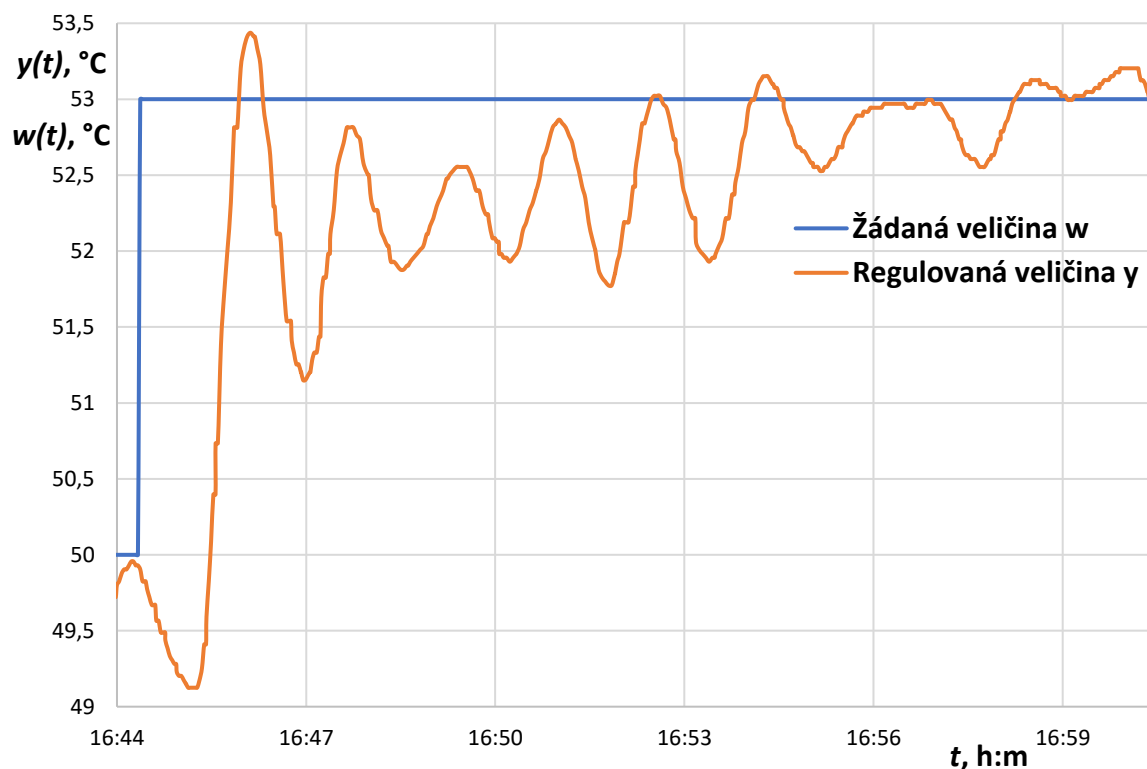


Obr. 2.13 – Další část technologického schématu se zásobníkem odpadního tepla

Výchozí nastavení

Program této soustavy se skládá z jednoho PI regulátoru, jehož výstup slouží k řízení ventilu, který pouští teplou vodu z horkovodu do tepelného výměníku. Výchozí nastavení PI regulátoru je zde zesílení $K_P = 3,3$ a integrační časová konstanta $T_I = 400$ s.

Po připojení k soustavě přes firemní VPN byla soustava opět ovládána přes Merbon IDE, kde přes ruční režim byla měněna hodnota požadované teploty vstupující do PI regulátoru. Byla provedena změna hodnota požadované teploty z 50 °C na 53 °C. Regulovaná veličina byla sledována přes vizualizační systém Merbon SCADA, kde byla převedena do programu Excel a výsledný regulační průběh můžeme vidět na obr. 2.14.



Obr. 2.14 – Výchozí nastavení regulace soustavy Beethoven – TUV

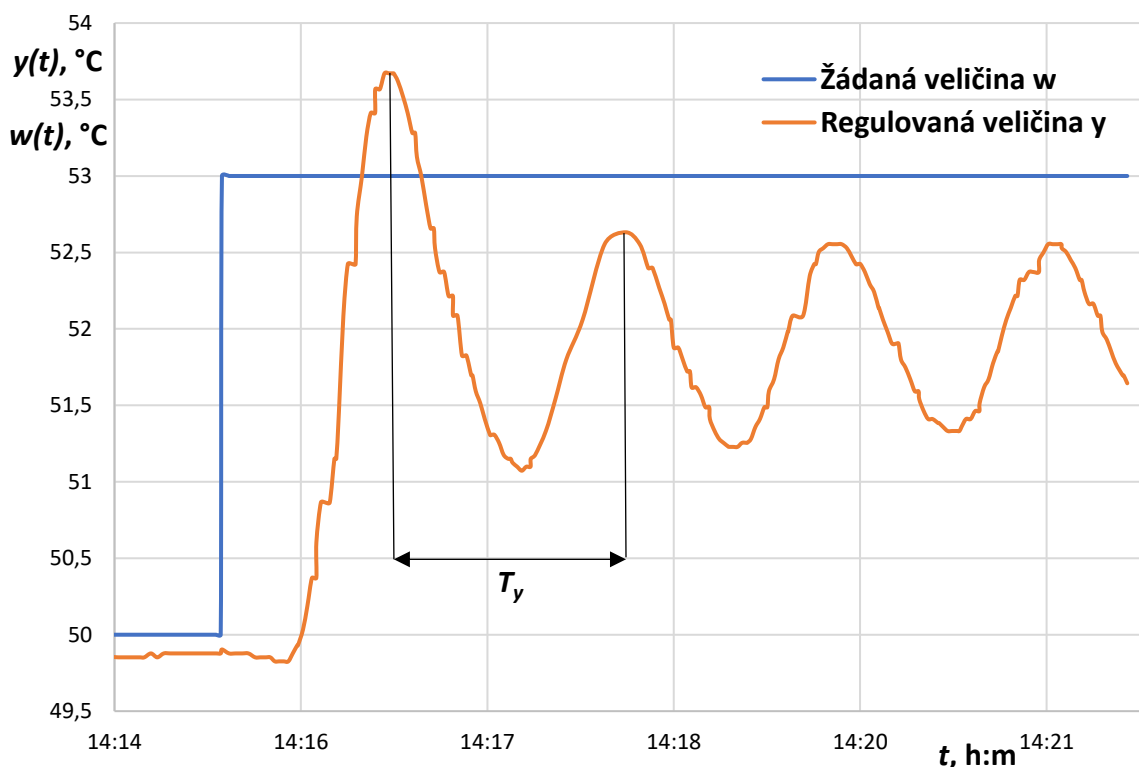
Podle časové osy můžeme vidět, že soustava pro ohřev TUV je mnohem rychlejší než soustava VZT. Regulace teploty trvá přibližně 3 minuty. Je to také tím, že přívodní voda z horkovodu vstupující do tepelného výměníku má právě kolem 100 °C a pouze malým otevřením ventilu se voda v tepelném výměníku rychle zahřívá.

Nastavení pomocí metody „pokus-omyl“

Podle jednotlivých kroků popsaných v kapitole 1.2.1 byla nejdříve provedena kontrola zapojení a funkčnosti členů přes vizualizační systém Merbon SCADA.

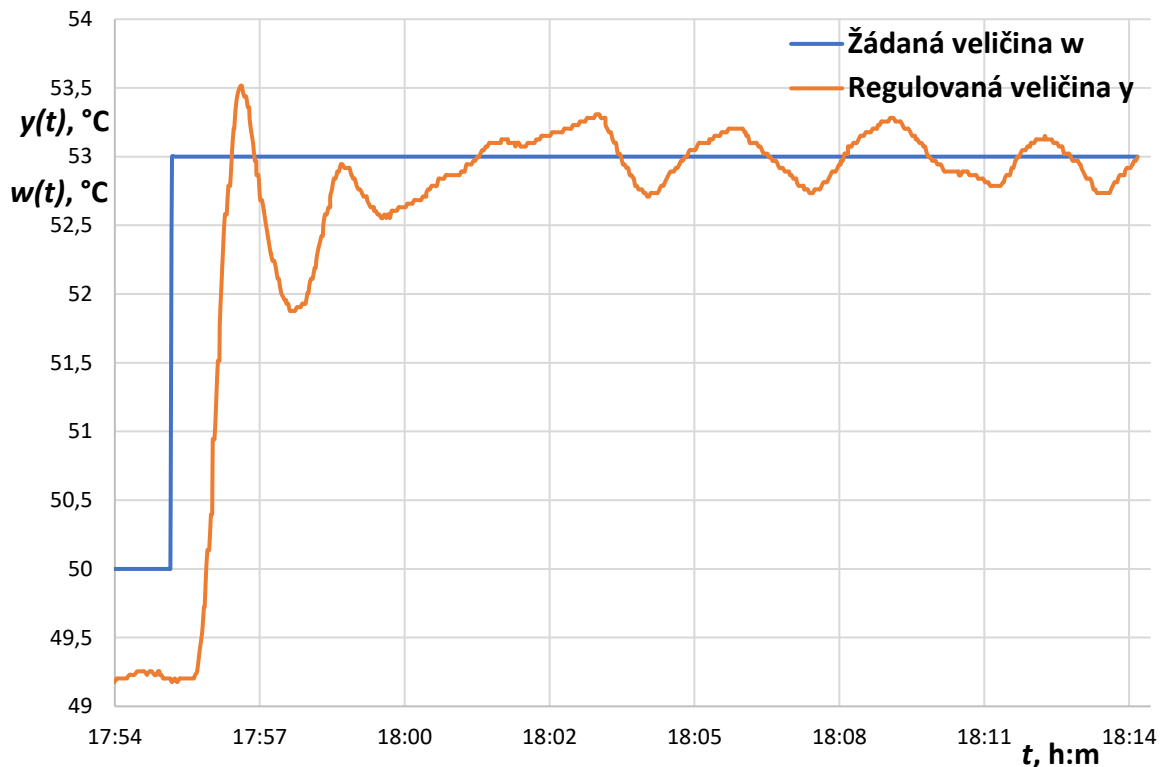
Požadovaná hodnota žádané veličiny $w(t)$ byla nastavena na 50 °C, integrační časová konstanta T_I byla vyřazena, derivační časová konstanta T_D je zde nepoužita a zesílení K_P bylo sníženo. Poté byla provedena skoková změna z 50 °C na 53 °C.

Postupně bylo zvyšováno zesílení K_P a byl sledován regulační průběh, který je na obr. 2.15, aby se podobal regulačnímu průběhu popsaným v kapitole 1.2.1 s požadovaným tlumením.



Obr. 2.15 – Přechová charakteristika $y(t)$ pro určení parametrů pomocí experimentální metody „pokus – omyl“ u soustavy Beethoven – TUV

Regulační průběh se nepovedlo dokonale přiblížit průběhu popsaným v kapitole 1.2.1, ale byl zde náznak tlumení s přítomností trvalé regulační odchylky. Z přechodové charakteristiky byla poté určena doba kmitu T_y , ze které byla vypočítána integrační časová konstanta $T_I = 0,67 \cdot T_y$ neboli $T_I = 80$ s. Zesílení se snížilo z předchozí hodnoty na 75 % kvůli velmi kmitavému regulačnímu ději, tudíž $K_P = 2,5$.



Obr. 2.16 – Výsledný regulační děj experimentální metody „pokus – omyl“ pro soustavu Beethoven – TUV

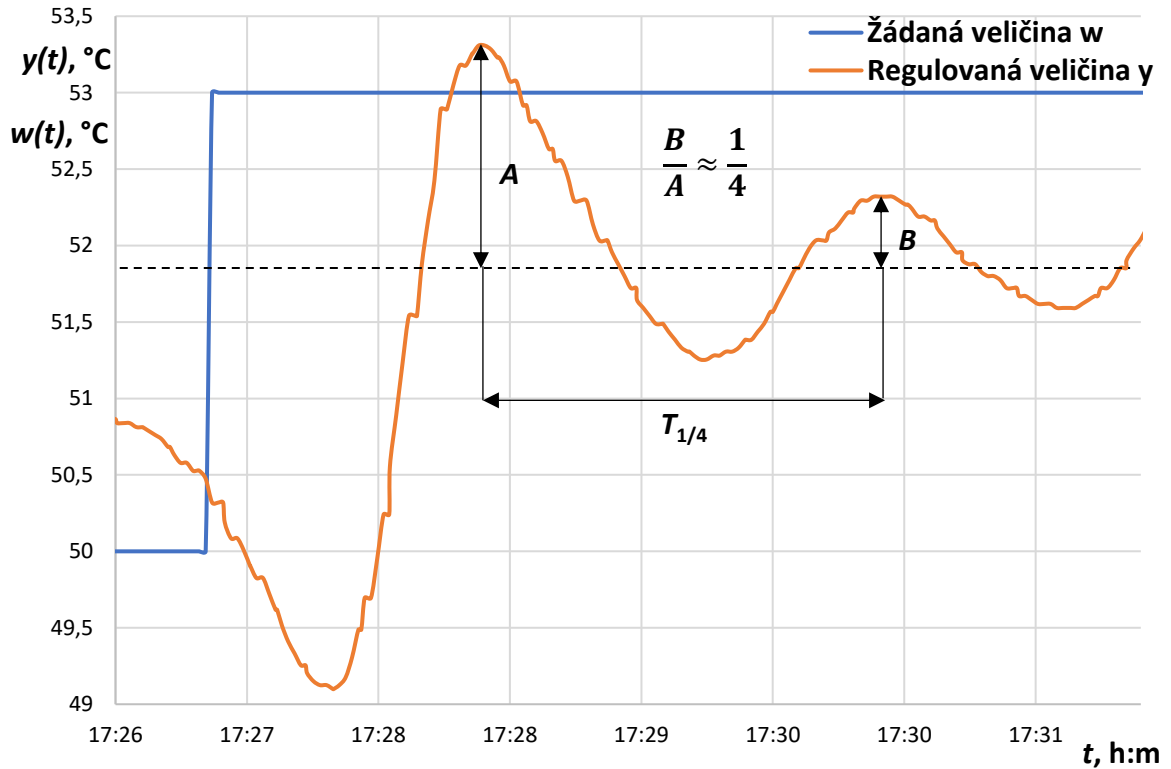
Poté byla provedena skoková změna z 50 °C na 53 °C. Regulační děj byl značně kmitavý, a tak byla snížena integrační časová konstanta na $T_I = 120$ s. Výsledný regulační pochod můžeme vidět na obr. 2.16. Regulace trvala přibližně 3 minuty, kdy se regulovaná veličina začala ustalovat až po druhém kmitu a kmitala okolo požadované hodnoty s odchylkou $\pm 0,3$ °C po dobu 15 minut.

Nastavení pomocí metody čtvrtinového tlumení

První dva kroky této metody jsou stejné jako u experimentální metody „pokus – omyl“, kdy kontrola zapojení a funkčnosti členů soustavy proběhla při měření první metody.

Opět byla nastavena žádaná veličina $w(t)$ na hodnotu 50 °C, vyřazena integrační časová konstanta T_I a sníženo zesílení K_P .

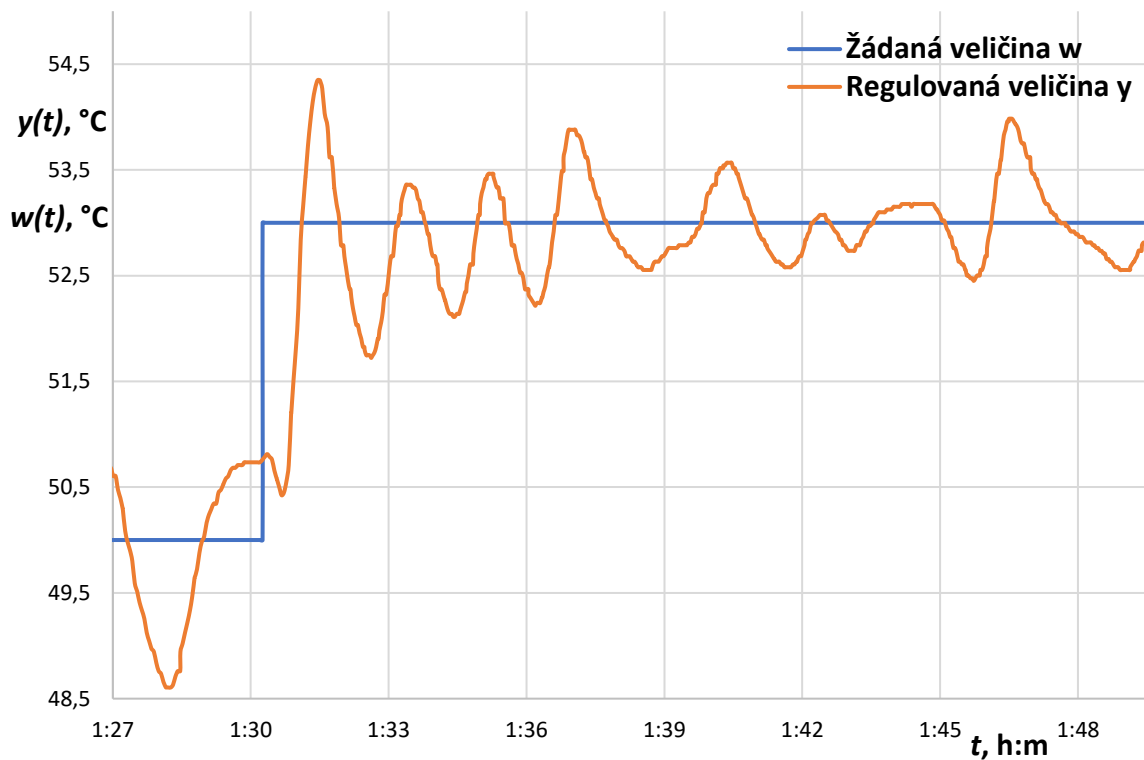
Při skokové změně bylo postupně zvyšováno zesílení K_P , aby přechodová charakteristika vypadala tak, aby podíl dvou po sobě jdoucích amplitud byl roven $1/4$ neboli útlum = 4.



Obr. 2.17 – Přechodová charakteristika $y(t)$ pro určení parametrů pomocí metody čtvrtinového tlumení u soustavy Beethoven – TUV

Z přechodové charakteristiky na obr. 2.17 byla odečtena doba kmitu $T_{1/4} = 130$ s a z nastavení regulátoru zesílení $K_{P1/4} = 2,9$.

Z tab. 1.1 byly podle typu regulátoru určeny jeho stavitelné parametry. Pro PI regulátor platilo pro zesílení $K_P = 0,9 \cdot K_{P1/4}$ a pro integrační časovou konstantu $T_I = T_{1/4}$. Po vypočtení parametrů vyšlo zesílení $K_P = 2,6$ a integrační časová konstanta $T_I = 130$ s.



Obr. 2.18 – Výsledný regulační děj metody čtvrtinového tlumení pro soustavu Beethoven – TUV

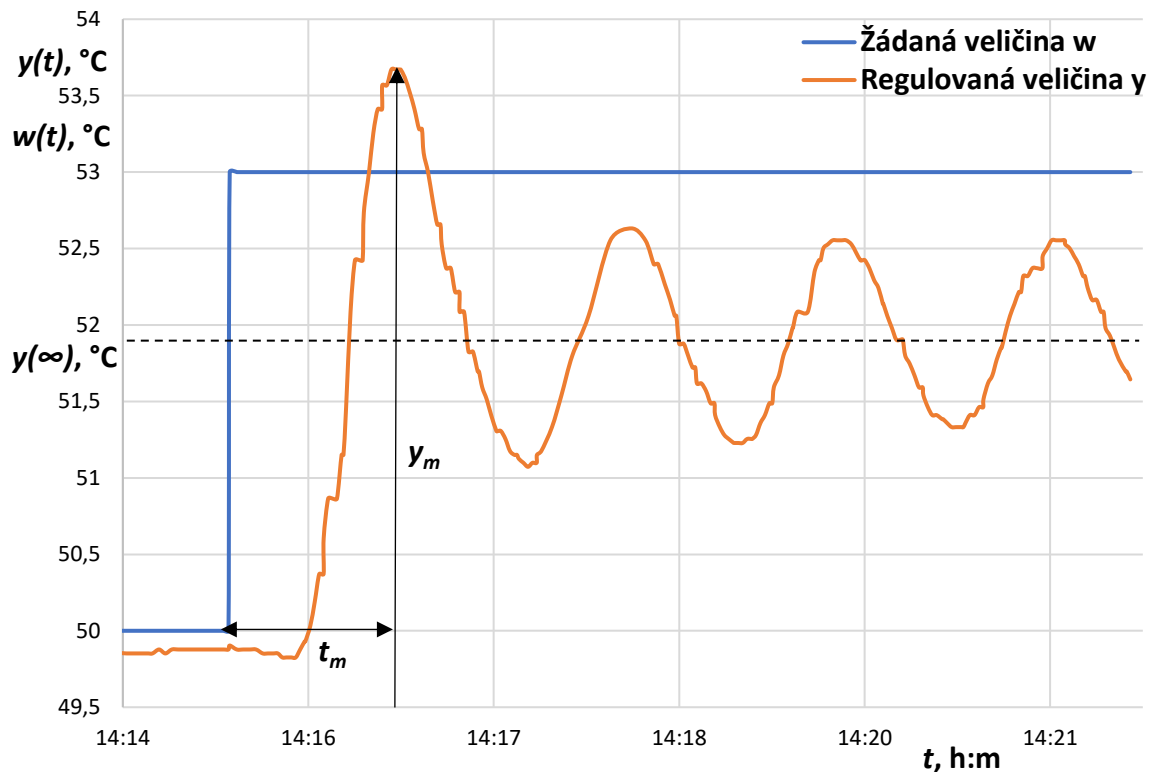
Po nastavení stavitelných parametrů do PI regulátoru byla provedena skoková změna z 50 °C na požadovanou teplotu 53 °C. Regulační průběh můžeme vidět na obr. 2.18. Regulace je rychlá a trvá přibližně 3 minuty s viditelným překmitem. Dále je regulační děj celkem kmitavý, kdy se regulovaná veličina pohybuje okolo požadované hodnoty s odchylkou $\pm 0,5$ °C. Regulace by se dala vylepšit zmenšením zesílení K_p .

Nastavení pomocí metody překmitu

Postup u prvních dvou kroků je opět stejný jako u experimentální metody „pokus – omyl“, kdy byla přeskočena kontrola zapojení a funkčnost členů soustavy.

Požadovaná hodnota $w(t)$ byla nastavena na 50 °C, integrační časová konstanta T_I byla zrušena a zesílení K_p sníženo.

Zesílení K_P bylo postupně zvyšováno tak, aby při skokové změně bylo dosaženo takové přechodové charakteristiky, která bude mít relativní překmit κ v rozmezí 0,1 až 0,6, nejlépe 0,3.



Obr. 2.19 – Přechodová charakteristika $y(t)$ pro určení parametrů pomocí metody překmitu u soustavy Beethoven – TUV

Z průběhu na obr. 2.19 byla určena:

- doba dosažení prvního maxima $t_m = 80$ s,
- relativní překmit $\kappa = \frac{y_m - y(\infty)}{y(\infty)} = 0,04$,
- zesílení otevřeného regulačního obvodu

$$k1K_{PO} = \frac{b'}{1-b'} = 43, b' = \frac{y(\infty)}{w_0} = 0,98.$$

Byl vypočten pomocný parametr

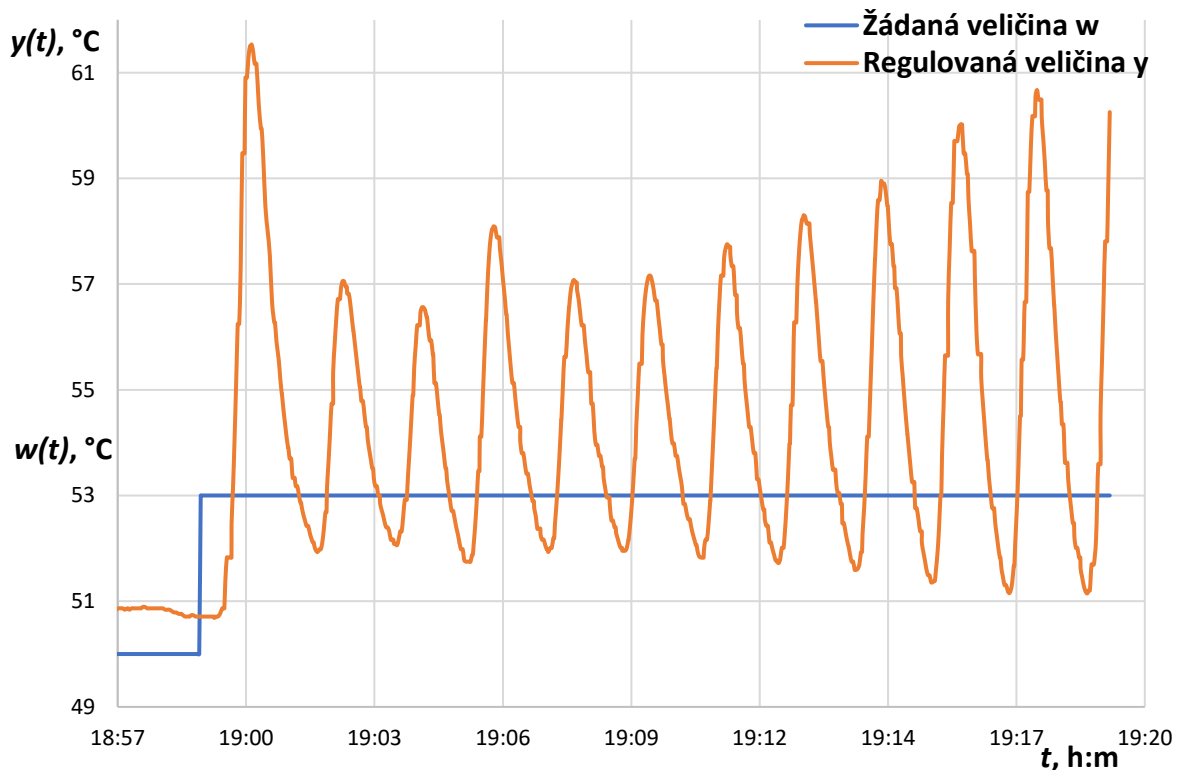
$$A' = 1,152\kappa^2 - 1,607\kappa + 1 = 0,94$$

a s pomocí pomocného parametru byly vypočteny hodnoty stavitelných parametrů PI regulátoru

$$K_P^* = K_{PO} \frac{A'}{F} = 5,$$

$$T_I^* = \min\left(0,86A't_m \frac{b'}{1-b'}; 2,44t_m F\right) = 390 \text{ s},$$

kde F je parametr pro doladění parametrů PI regulátoru, kde bylo zvoleno $F = 2$ pro pomalejší, ale více robustní nastavení.



Obr. 2.20 – Výsledný regulační děj metody překmitu pro soustavu Beethoven – TUV

Po zapsání parametrů do PI regulátoru byla provedena skoková změna z 50 °C na požadovaných 53 °C. Regulaci na obr. 2.20 není považována za přijatelnou z důvodu kmitavého regulačního děje s velkými překmity nad požadovanou hodnotu i přes to, že byl zvolen velký parametr F pro pomalejší, ale robustní regulační děj. Byl vyzkoušen i vyšší parametr $F = 5$, ale výsledek se o moc nezlepšil.

2.1.3 CP Čestlice

Objekt nacházející se v Praze, který vidíme na obr. 2.21, zahrnuje dva showroomy (Jaguar, Volvo), servisy a bazary pro jednotlivé automobilové značky, myčku a administrativní

kanceláře. Zde je řešena regulace teploty pro přívod vzduchu ze vzduchotechniky do administrativy a showroomu automobilové značky Volvo.

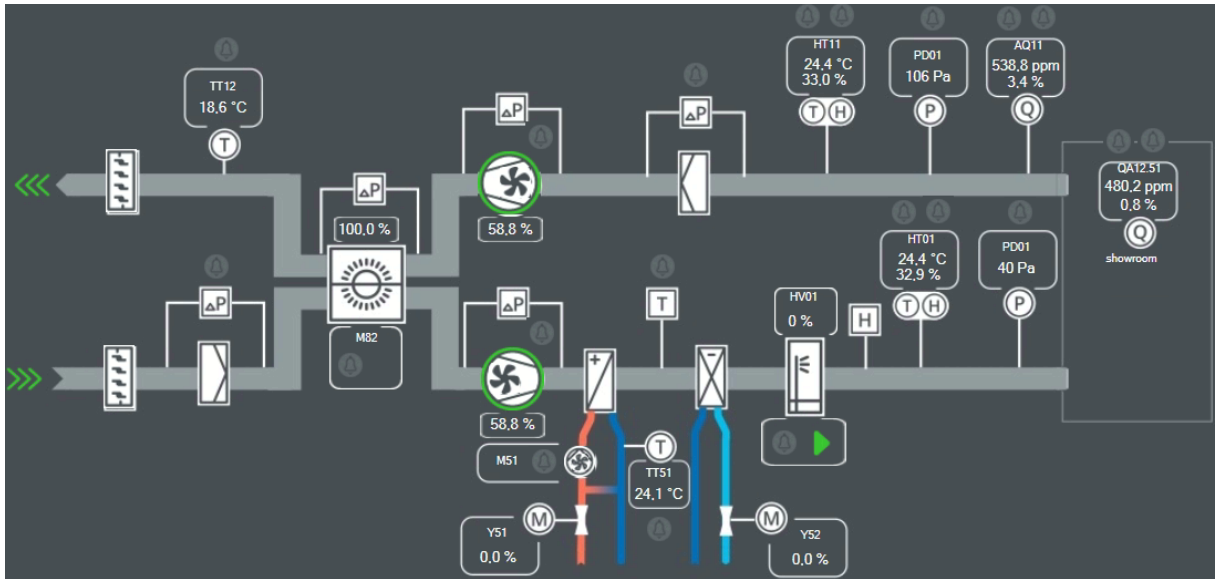


Obr. 2.21 – Budova CP Čestlice

Technologické schéma

Technologické schéma vzduchotechniky můžeme vidět na obr. 2.22. Je podobné technologickému schématu, které bylo v budově Beethoven. Přívodní venkovní vzduch je nasáván opět přes filtr a ventilátor na ohřivač a chladič vzduchu, kde se podle potřeby přívodní venkovní vzduch buď ohřívá, nebo chladí. Zde bylo řešeno ohřívání přívodního vzduchu, kdy vzduch proudí přes ohřivač, který může teplotu vzduchu ovlivnit zvýšením průtoku teplé vody v ohřivači. O průtok teplé vody v ohřivači se stará čerpadlo a ventil, který se otevírá podle výstupu z PI regulátoru. Zvlhčovač před přívodem do prostoru zvlhčuje přiváděný vzduch podle vlhkosti vzduchu, která je měřena na odtahu vzduchotechniky. Množství přiváděného čerstvého vzduchu je řízeno podle kombinovaného čidla CO₂ a kvality vzduchu v odtahovém

potrubí. Na rozdíl od budovy Beethoven, zde není klapka pro cirkulaci ohřátého vzduchu, pouze rotační rekuperátor pro ohřátí studeného přívodního vzduchu.

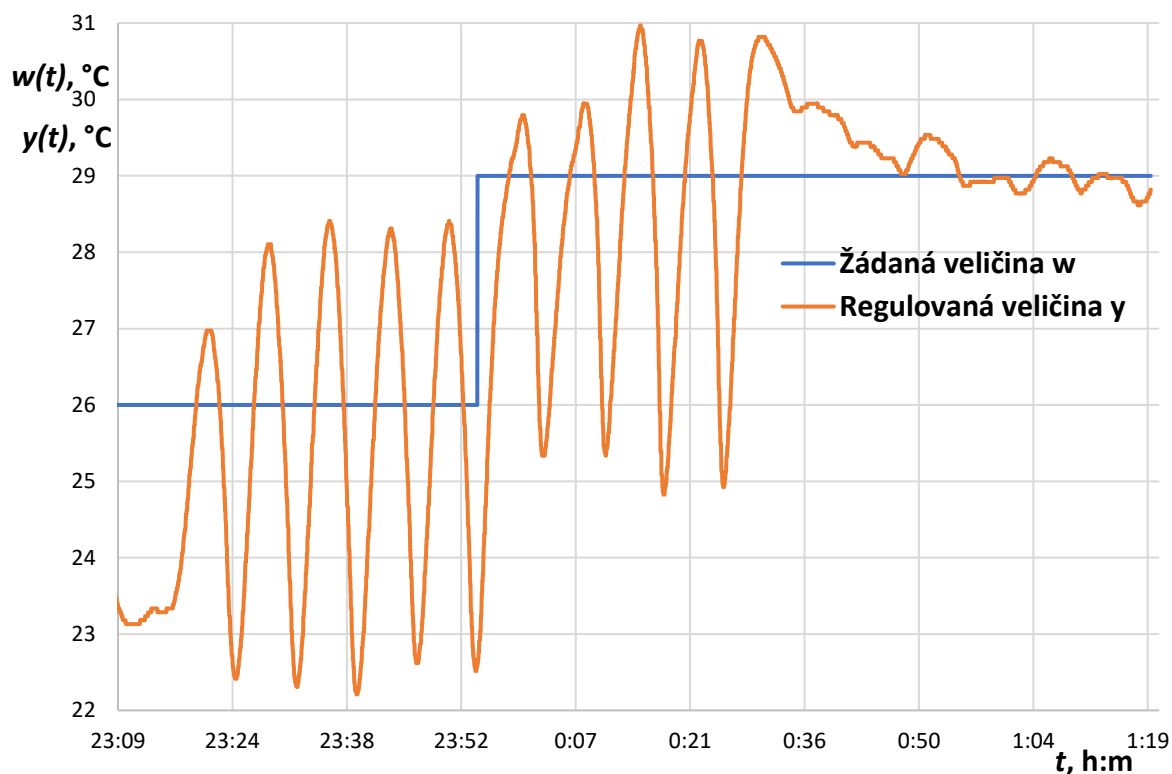


Obr. 2.22 – Technologické schéma vzduchotechniky v budově CP Čestlice

Výchozí nastavení

Program pro regulaci soustavy se skládá ze dvou PI regulátorů. Jednotlivé výstupy regulátorů slouží pro ovládání ventilů pro ohřivač nebo chladič přívodního vzduchu. Na rozdíl od vzduchotechniky v budově Beethoven zde není odlišná požadovaná teplota chlazení a požadovaná teplota jde jedna společná do obou regulátorů, tudíž pracují souběžně. Oba regulátory mají nastavené stejné parametry, a to proporcionalní pásmo $X_P = 30$ a integrační časovou konstantu $T_I = 400$ s. Výstup regulátoru je klasicky omezen na 0 až 100 %. Také v bloku rekuperace jsou nastaveny jiné parametry než u vzduchotechniky v budově Beethoven. To znamená, že jsou zde jiné parametry pro start sekvence topení a start rekuperace neboli zónu necitlivosti.

Pro měření bylo nutné připojit se přes vzdálenou plochu pomocí programu Anydesk. Na tomto vzdáleném počítači byl jediný možný přístup pro připojení se na PLC a sledování grafů přes Merbon SCADA, kde byly jednotlivé grafy převedeny do Excelu.



Obr. 2.23 – Výchozí nastavení regulace soustavy CP Čestlice – VZT

V Merbon IDE bylo zapnuto ladění soustavy a vyzkoušeno pár skokových změn požadované teploty z 23 °C na 26 °C a poté na 29 °C. Regulační pochod můžeme vidět na obr. 2.23.

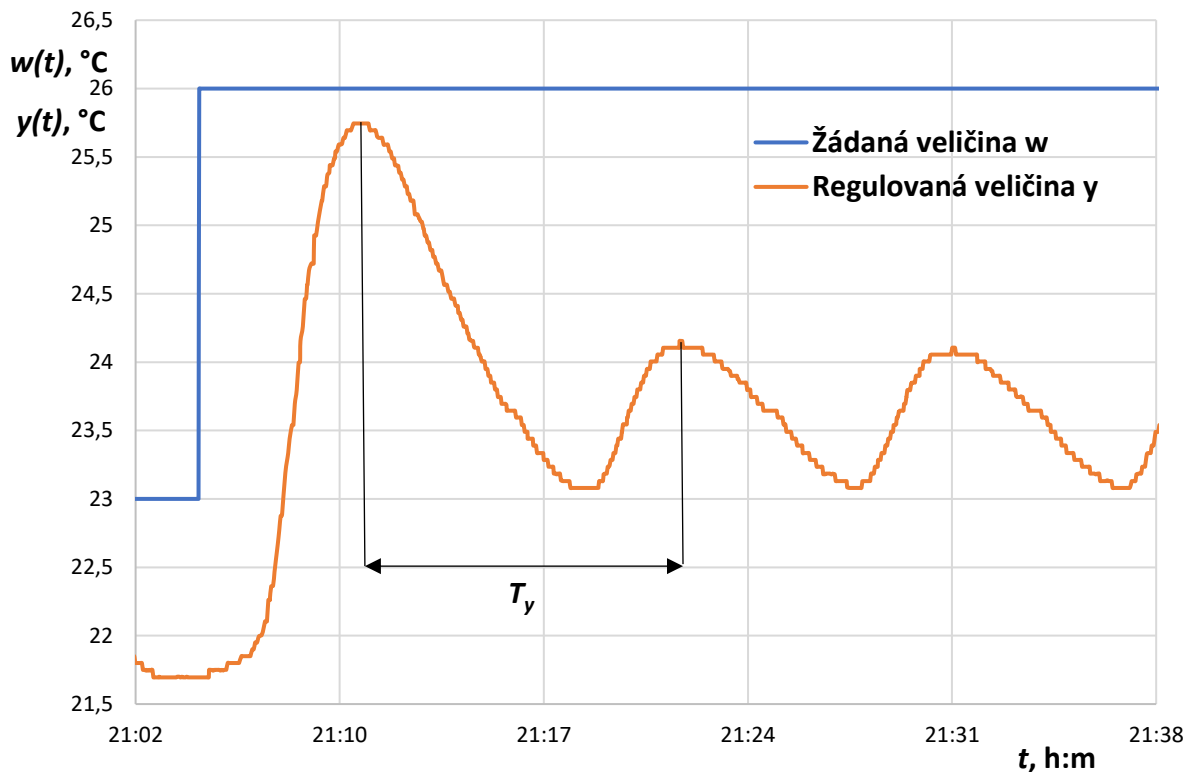
Už na první pohled je vidět, že regulační děj je značně kmitavý. Regulovaná veličina kmitala okolo požadované teploty v rozmezí ± 3 °C. Je to z důvodu, že byl vypnut PI regulátor pro chlazení. Při požadované teplotě 29 °C byl po chvíli zapnut PI regulátor pro chlazení a je vidět, že regulační děj byl přibližně do 10 minut stabilní.

Nastavení pomocí metody „pokus-omyl“

Přes vizualizační systém Merbon SCADA byla provedena kontrola zapojení a ověřena funkčnost jednotlivých členů soustavy.

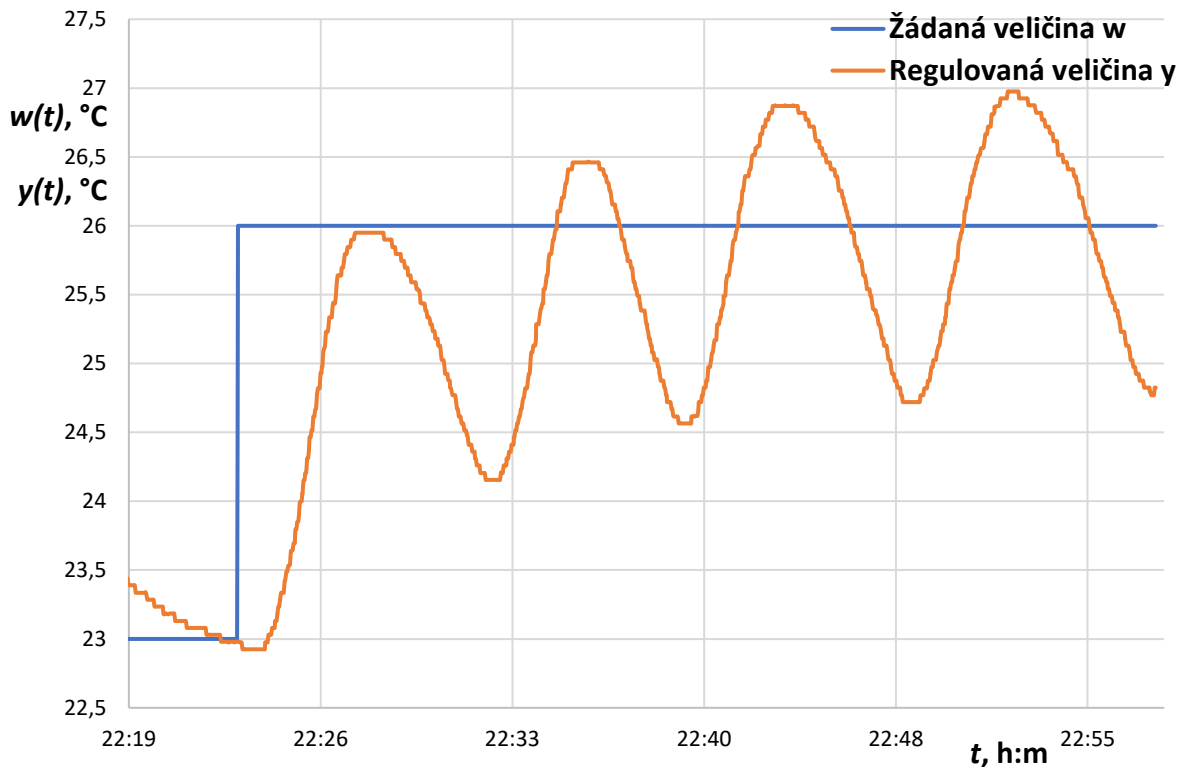
Požadovaná hodnota $w(t)$ byla nastavena na 23 °C, integrační časová konstanta T_I vyřazena a zesílení K_P zmenšeno. Derivační časová konstanta T_D je zde nevyužita.

Zesílení K_P se postupně zvyšovalo, dokud při skokové změně žádané veličiny $w(t)$ nebyl dosažen kmitavý průběh regulované veličiny $y(t)$ s požadovaným tlumením.



Obr. 2.24 – Přejchodová charakteristika $y(t)$ pro určení parametrů pomocí experimentální metody „pokus – omyl“ u soustavy CP Čestlice – VZT

Regulační pochod skokové změny vidíme na obr. 2.24, kde bylo přibližně dosaženo kmitavého průběhu regulované veličiny $y(t)$ s požadovaným tlumením, jak je popsáno v teoretické metodě. Z přechodové charakteristiky byla určena doba kmitu $T_y = 660$ s, ze které byla poté vypočítána integrační časová konstanta T_I , kdy se uvádí, že rozumná integrační časová konstanta $T_I = 0,67 \cdot T_y$, tudíž $T_I = 442$ s. Zesílení bylo sníženo na 90 % původní hodnoty, tedy $K_P = 8,1$.



Obr. 2.25 – Výsledný regulační děj experimentální metody „pokus – omyl“ pro soustavu CP Čestlice – VZT

Určené parametry integrační časové konstanty a zesílení byly nastaveny do PI regulátoru a poté byla provedena skoková změna z 23 °C na požadovaných 26 °C. Regulační děj na obr. 2.25 vypadal z počátku u prvního kmitu v pořádku, jenže pak začala soustava kmitat. Změnou parametrů v PI regulátoru se regulační děj moc nezměnil. Možná příčina je konfigurace bloku rekuperace, která ovlivňovala požadavek pro ohřev přívodního vzduchu.

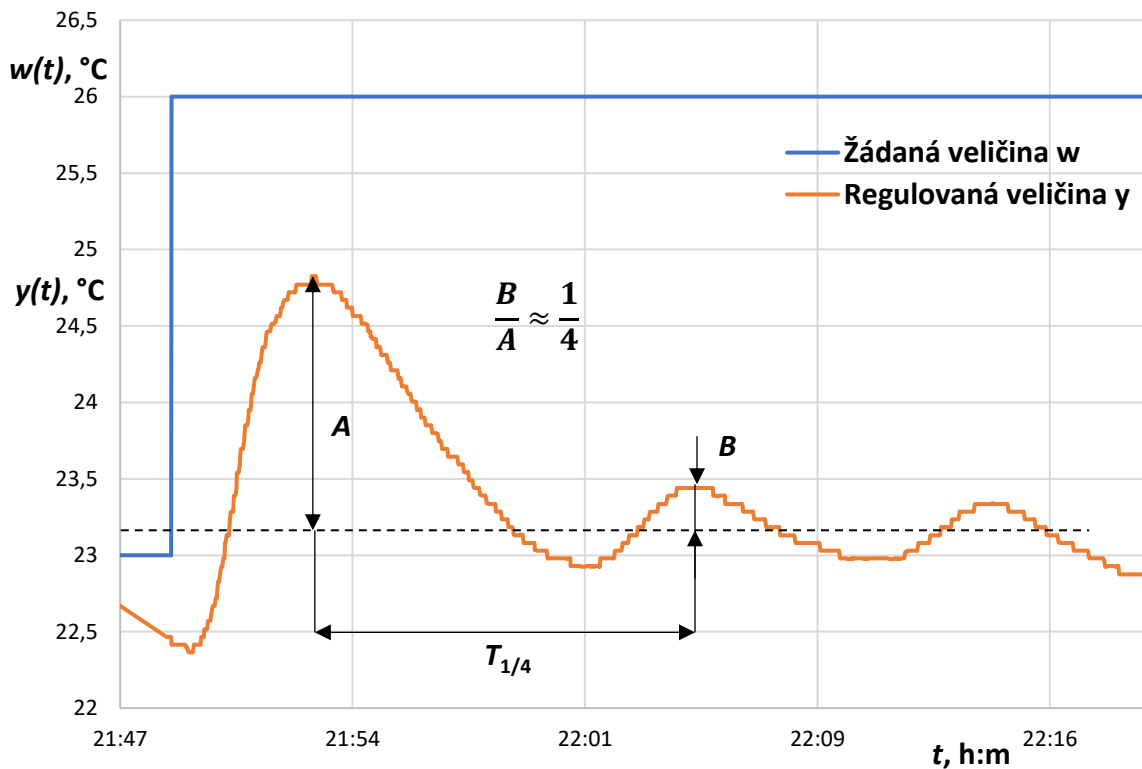
Nastavení pomocí metody čtvrtinového tlumení

U prvních dvou kroků se postupovalo stejně jako u experimentální metody „pokus – omyl“, kdy byla kontrola zapojení a funkčnosti členů přeskočena.

Žádaná veličina $w(t)$ byla nastavena na 20 °C a poté se nechala ustálit. Vyřadila se integrační časová konstanta T_I a snížilo se zesílení K_P .

Dále bylo provedeno několik skokových změn z 23 °C na 26 °C a u každé skokové změny bylo pomalu zvyšováno zesílení K_P , aby bylo dosaženo takové přechodové

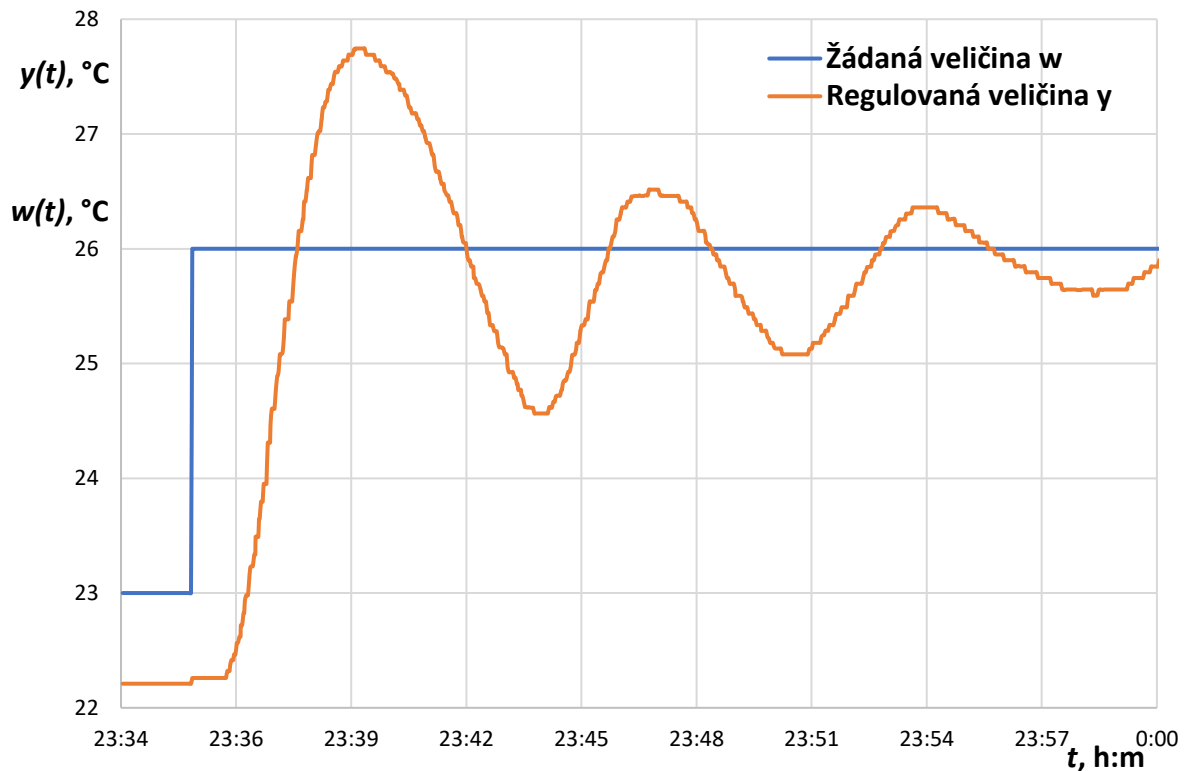
charakteristiky, kdy poměr dvou po sobě jdoucích amplitud byl roven $1/4$. Takové přechodové charakteristiky se povedlo přibližně dosáhnout na obr. 2.26.



Obr. 2.26 – Přechodová charakteristika $y(t)$ pro určení parametrů pomocí metody čtvrtinového tlumení u soustavy CP Čestlice – VZT

Z přechodové charakteristiky byla poté odečtena doba kmitu $T_{1/4} = 720$ s a z vlastností PI regulátoru jeho hodnota zesílení $K_P = 8,3$.

Poté byly určeny hodnoty stavitelných parametrů podle tab. 1.1, kdy pro PI regulátor platí vztah pro integrační časovou konstantu $T_I = T_{1/4} = 720$ s a pro zesílení vztah $K_P = 0,9 \cdot K_{P1/4} = 7,5$.



Obr. 2.27 – Výsledný regulační děj metody čtvrtinového tlumení pro soustavu CP Čestlice – VZT

Vypočtené parametry byly nastaveny do vlastností PI regulátoru a byla provedena skoková změna z 23 °C na požadovanou teplotu 26 °C. Regulační děj můžeme vidět na obr. 2.27, kdy regulovaná veličina nejdříve v prvním kmitu vysoce překmitla nad požadovanou teplotu skoro o 2 °C a v dalším kmitu byl už náznak tlumení regulované veličiny. Regulace tedy trvala přibližně 10 minut a regulační pochod by se mohl zlepšit zmenšením zesílení K_P .

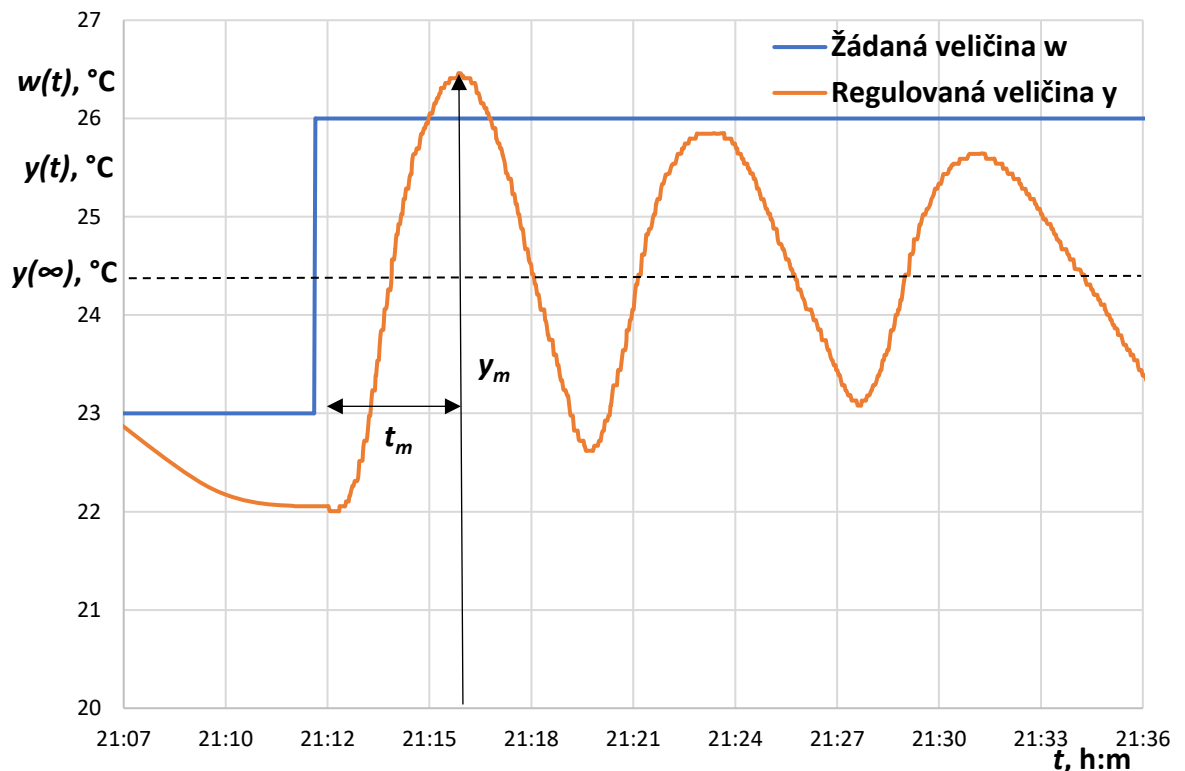
Nastavení pomocí metody překmitu

První dva kroky metody překmitu byly opět stejné jako u experimentální metody „pokus – omyl“, kdy jsem přeskočil kontrolu zapojení a funkčnosti členů soustavy.

Požadovaná teplota byla nastavena na 23 °C, integrační časová konstanta T_I vyřazena a zesílení K_P sníženo.

Poté byla snaha přiblížit se přechodové charakteristice $y(t)$ postupným snižováním zesílení K_P , aby při skokové změně žádané veličiny $w(t)$ z 23 °C na 26 °C bylo dosaženo relativního překmitu κ v rozmezí 0,1 až 0,6. Na této soustavě bylo konečně dosaženo alespoň

minima tohoto relativního překmitu $\kappa = 0,1$, kde na ostatních soustavách bylo $\kappa < 0,1$.
Přechodová charakteristika $y(t)$ je vidět na obr. 2.28.



Obr. 2.28 – Přechodová charakteristika $y(t)$ pro určení parametrů pomocí metody překmitu u soustavy CP Čestlice – VZT

Z regulačního děje regulační veličiny $y(t)$ byla poté určena:

- doba dosažení prvního maxima $t_m = 240$ s,
- relativní překmit $\kappa = \frac{y_m - y(\infty)}{y(\infty)} = 0,1$,
- zesílení otevřeného regulačního obvodu

$$k_1 K_{PO} = \frac{b'}{1-b'} \cong 14, b' = \frac{y(\infty)}{w_0} = 0,93.$$

Byl vypočten pomocný parametr

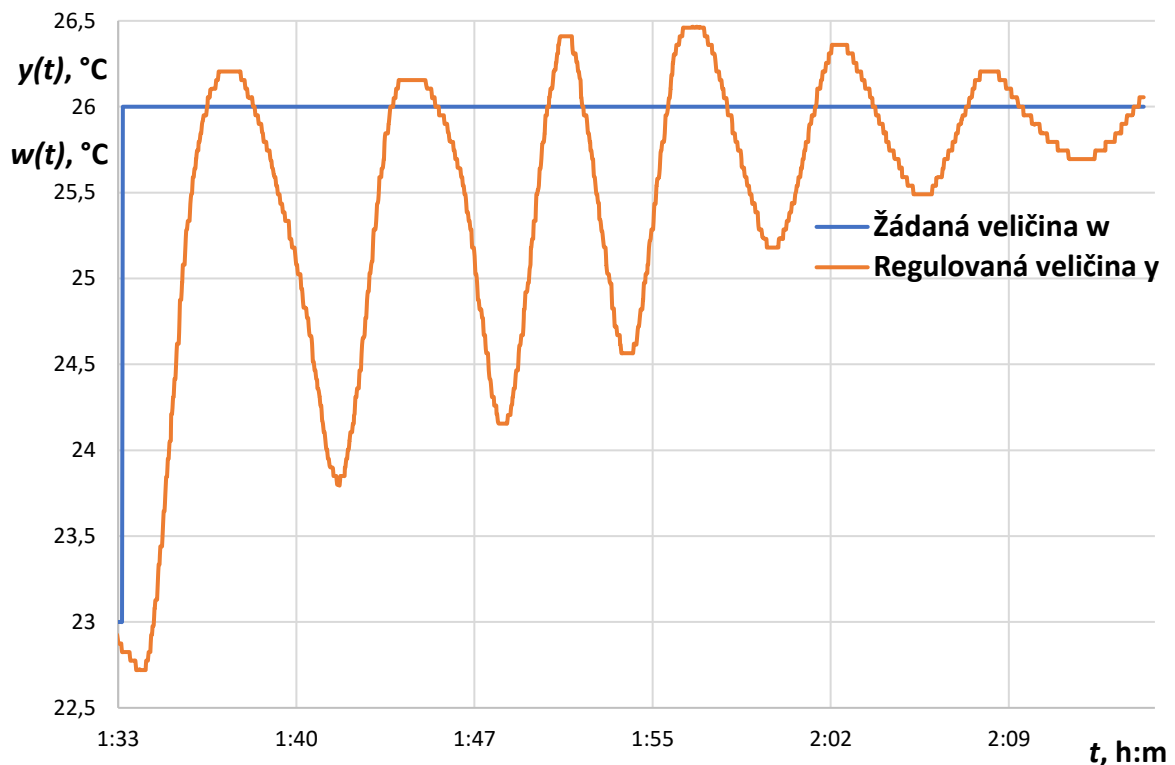
$$A' = 1,152\kappa^2 - 1,607\kappa + 1 = 0,85$$

a pak vypočítány jednotlivé parametry pro PI regulátor

$$K_P^* = K_{PO} \frac{A'}{F} \cong 11,8,$$

$$T_I^* = \min\left(0,86A't_m \frac{b'}{1-b'}; 2,44t_m F\right) = 585,6$$
 s,

kde F je parametr pro doladění soustavy podle potřeby. Zde byla zvolena velikost parametru $F = 1$ pro rychlý a robustní regulační pochod.



Obr. 2.29 – Výsledný regulační děj metody překmitu pro soustavu CP Čestlice – VZT

Po nastavení vypočtených parametrů do PI regulátoru byla provedena skoková změna z 23 °C na požadovaných 26 °C. Regulační děj na regulované veličiny $y(t)$ na obr. 2.29 se dostal na požadovanou teplotu velmi rychle během 4 minut, ale poté začal kmitat z větší části pod požadovanou teplotou. Regulační pochod regulované veličiny se začal ustalovat někdy kolem 20. minuty regulace. Za tento průběh regulované veličiny může opět asi nastavení bloku rekuperace, který z velké části ovlivňuje požadavek na ohřev vzduchu.

2.2 NÁVRH POSTUPU REGULACE

Ve stručnosti bychom v praxi mohli postupovat takto:

- kontrola periférií 1:1 (např. odporová čidla teploty odpojením nebo zkratováním),
- prohlídka soustavy, zda není nějaká chyba v technologii (vadný ventil nebo čerpadlo),
- připojení k PLC a nahrání SW do PLC,
- určení rozmezí výstupů regulátorů (většinou 0 až 100 %),

- kontrola funkčnosti mapovaných proměnných v technologickém schématu zobrazeném přes Webserver nebo vizualizační systém SCADA,
- zobrazení regulované veličiny $y(t)$ a žádané veličiny $w(t)$ v trendech s možným ukládáním do historie,
- podle zkušenosti, buď parametry regulátoru pro danou soustavu odhadnout (např. z předchozích projektů), nebo použít některou z teoretických metod,
- po úspěšném i neúspěšném ladění regulace soustavy je důležité získat vzdálený přístup k soustavě pro další měření,
- ošetření alarmových stavů.

Tento postup se může v různých případech lišit. Záleží, zda se jedná o novou realizaci stavby nebo jen opravu stávající regulace. Pokud se jedná o novou realizaci, je také dobré sehnat kontakty na všechny různé profese, například techniky, kteří připravují potrubí, nebo tahají kabely. Jedná se hlavně o domluvu, aby se na něco nezapomnělo, například návarky na potrubí pro čidla nebo označení kabelů v rozvaděči.

3 ZHODNOCENÍ

Měření na jednotlivých soustavách přineslo hodně naměřených dat k posouzení, jaká metoda byla pro danou soustavu lepší a jaká horší. Na většinu měření se muselo čekat mimo pracovní dobu, kde by výkyvy teplot o 3 °C například z přívodu vzduchotechniky zhoršily komfort v místnosti.

U administrativní budovy Beethoven se měřilo na dvou soustavách, nejprve na vzduchotechnice a poté na výměňkové stanici pro ohřev TUV. U soustavy vzduchotechniky lze za úspěšné považovat všechny použité teoretické metody regulace, protože regulační pochody regulační veličiny $y(t)$ probíhaly bez větších překmitů a držely se stabilně okolo žádané veličiny $w(t)$.

U soustavy s výměňkovou stanicí pro ohřev TUV už se všechny použité teoretické metody nedaly považovat za vyhovující. Nejlepší metodou vyšla experimentální metoda „pokus – omyl“, kdy stačilo lehce doladit parametr integrační časové konstanty T_I , aby regulační děj nebyl tolik kmitavý. Metoda čtvrtinového tlumení na tom byla o trochu hůře, kdy došlo k větším překmitům a regulační obvod kmital ve větším rozmezí teplot. Nejhůře na tom byla metoda překmitu, kdy regulovaná veličina velmi kmitala okolo požadované teploty s velkými překmity, kde mohlo dojít na soustavě k alarmu pro přetopení vody v tepelném výměníku. Moc nepomohla ani změna parametru F pro doladění parametrů regulátoru. Pomohlo by možná pouze zmenšení zesílení, ale to metoda nedovolovala.

Poslední soustava, na které se měřilo, byla soustava vzduchotechniky v budově CP Čestlice. Podle technologického schématu je podobná soustavě vzduchotechniky v budově Beethoven, ale podle chování je zcela odlišná. Hned u bloků PI regulátorů byl rozdíl v tom, že do nich vstupovala jedna žádaná hodnota $w(t)$, tím pádem při skokové změně výstup PI regulátoru pro chlazení ovlivňoval PI regulátor pro ohřev. Aby byla zachována jednotnost v testování metod, tak byl PI regulátor v ručním režimu vypnut. Dalším rozdílem v této soustavě oproti soustavě vzduchotechniky v budově Beethoven bylo rozdílné nastavení bloku rekuperace. Právě výstup z PI regulátoru vcházel do bloku rekuperace a ovlivňoval celou regulaci. Tento blok rekuperace radši nebyl modifikován, aby nějakým způsobem nepoškodil danou soustavu. Na této soustavě byly vyzkoušeny teoretické metody regulace, a naopak od první soustavy vzduchotechniky, zde není považován ani jeden regulační děj regulované veličiny $y(t)$ změřený teoretickou metodou za vyhovující. Regulaci dost ovlivnilo použití pouze

jednoho PI regulátoru a blok rekuperace, kde je vidět jakoby se regulovaná veličina $y(t)$ odrážela ode dna místo plynulé regulace k žádané veličině $w(t)$.

Když by měla být vybrána nejlepší metoda, která byla použita, tak nejvíc vyhovovala experimentální metoda „pokus – omyl“ z důvodu, že tato metoda je dost flexibilní, kdy po doporučeném nastavení parametrů bylo zjištěno, jak se soustava chová a poté bylo možné podle potřeby libovolně doladit parametry regulátoru. Toto doladění parametrů chybělo u druhé metody čtvrtinového tlumení, kdy byly parametry regulátoru dané pouze tabulkou pro daný typ regulátoru. U třetí použité metody překmitu šlo doladit parametry pouze parametrem F , který ale ovlivňoval zesílení K_P i integrační časovou konstantu T_I najednou. V praxi by samozřejmě nebylo důležité lpět na přesném dodržení postupu dané metody a kritické parametry by mohly být nastaveny podle potřeby.

Další možností by bylo použití jiných metod například vyžadující model soustavy jako je metoda SIMC, metoda požadovaného modelu nebo metoda násobného dominantního pólu.

4 ZÁVĚR

Většinu těchto experimentů se soustavami bylo obtížné realizovat, protože by byl narušen komfort v obvyklé pracovní době, proto byly tyto experimenty se soustavami prováděny mimo pracovní dobu nebo ve večerních hodinách. Zde nastával problém s velmi rychle klesající venkovní teplotou, která ovlivňovala výsledky regulace. I když některé výsledky metod nebyly považovány za vyhovující, tak ve většině případů došlo ke zlepšení regulace regulované veličiny oproti výchozímu nastavení soustavy.

Možným zlepšením regulace by bylo navrhnutí bloku adaptivního regulátoru, kde by se parametry regulátoru průběžně přepočítávaly například podle aktuální venkovní teploty. Tím by odpadlo testování soustav zvláště v létě a v zimě pro výpočet parametrů pro režim léto/zima. Dalším možným námětem by byla i regulace podle předpovědi počasí, protože venkovní teplota nebo třeba svit slunce hraje velkou roli v regulaci v systémech vytápění a klimatizace.

POUŽITÁ LITERATURA

VÍTEČKOVÁ, M.; VÍTEČEK, A. 2011. *Vybrané metody seřizování regulátorů. 1. vydání.*
Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita. 230 s. ISBN 978-80-248-2503-8.

Co znamená PID. *Automa*. 2003(3). [online]. [cit. 4. 5. 2021]. Dostupné z:
<https://1url.cz/DKQJ6>.

Popis zónové regulace. *Jablotron*. 2013. [online]. [cit. 7. 5. 2021]. Dostupné z:
<https://1url.cz/UKQ5I>.

PŘÍLOHY

A – CD

Příloha k diplomové práci

Návrh regulace v systémech vytápění a klimatizace

Bc. Jan Tesner

CD

Obsah

- 1 Text diplomové práce ve formátu PDF

