ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ, Katedra řídicí techniky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

ALGORITMUS VÍCEROZMĚROVÉHO REGULÁTORU

2005 **Tomáš Fencl**

ČVUT FEL Praha

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literatura, projekty, SW atd.) uvedené v přiloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském a právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 10. 1. 2005 …….

podpis

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce Doc. Ing. Janu Bílkovi CSc. za podnětné připomínky k práci. Dále zaměstnancům firem Siemens a Teco za pomoc při řešení technických problémů. Taktéž Prof. Ing. Zítkovi DrSc. a Ing. Vyhlídalovi Ph.D. za umožnění měření na tepelné soustavě.

Taktéž bych velmi rád poděkoval své rodině, která mne po dobu studia materiálně i psychicky podporovala, a všem dalším, kteří mě jakkoliv podpořili.

Abstrakt

Tato práce popisuje řízení výměníkové stanice teplé užitkové vody bez použití akumulační nádrže. Ve stanici jsou použity deskové výměníky tepla, které mají vysokou účinnost. V rámci práce byl v programu Matlab vytvořen simulační model stanice. Řízení teploty teplé užitkové vody zajišťuje PD regulátor s proměnným zesílením akčního zásahu. PD regulátor byl vytvořen v prostředí Mosaic, které simuluje programovatelný automat. V programu Reliance byla vytvořena vizualizace, která umožnila spojení programů Matlab a Mosaic.

Abstract

In this document, control of a heat exchanger station without hot water storage reservoir is described. The exchanger station contains plate heat exchangers that are highly energy efficient. A simulation model of the plate heat exchanger station was developed in IDE Matlab. The control is realized by a PD controller with gain scheduling. The PD controller is produced in IDE Mosaic that simulates a programable logical controller. Visualisation is made in Reliance program, which also enables connection between Matlab (model) and Mosaic (controller).

Obsah

Obsah ..... *I*

Seznam obrázků ..... *III*

Seznam tabulek ..... *V*

Úvod: *1*

1 Vlastnosti výměníkových stanic *3*

1.1 Spotřeba TUV **3**

1.2 Vliv kvality vody **8**

1.3 Stanice s akumulačním výměníkem **10**

1.4 Stanice s deskovým výměníkem **11**

2 Model výměníkové stanice *13*

2.1 Model akumulační nádrže **14**

2.2 Model ventilu **15**

2.3 Model čerpadla **16**

2.4 Model směšování **17**

2.5 Model odběrů **18**

2.6 Model deskového výměníku **19**

2.6.1 Model 1 21

2.6.2 Model 2 23

2.6.3 Zdůvodnění výběru modelu 26

2.6.4 Přesnost modelu 27

3 Regulace výměníkové stanice TUV *33*

3.1 Regulace pomocí klasického PD regulátoru **35**

3.2 Regulace pomocí PD regulátoru s proměnnými parametry **37**

4 Implementace v PLC *43*

4.1 DDE **44**

5 Použití regulace s proměnným zesílením akčního zásahu *47*

6 Závěr *49*

7 Literatura ..... *i*

8 Přílohy ..... *iii*

8.1 Teplota vody přiváděné z teplárny 100°C ..... **iv**

8.2 Teplota vody přiváděné z teplárny 90°C ..... **v**

8.3 Teplota vody přiváděné z teplárny 80°C ..... **vi**

8.4 Teplota vody přiváděné z teplárny 70°C ..... **vii**

8.5 Obsah CD ..... **viii**

Seznam obrázků

Obr. 1.1-Měrný výkon na osobu 3

Obr. 1.2–Potřebný výkon pro ohřev TUV během roku 4

Obr. 1.3-Potřebný výkon pro ohřev TUV ve všední den 5

Obr. 1.4 – Potřebný výkon pro ohřev TUV v neděli 5

Obr. 1.5-Akumulační ohřívák 10

Obr. 1.6-Výměníková stanice s akumulační nádrží 11

Obr. 2.1-Struktura modelu výměníkové stanice 13

Obr. 2.2–Akumulační nádrž 14

Obr. 2.3–Přechodová charakteristika modelu ventilu 16

Obr. 2.4-Směšování 17

Obr. 2.5-Odběr TUV 18

Obr. 2.6–Deskový výměník [7] 19

Obr. 2.7–Deskový protiproudý výměník 20

Obr. 2.8–Průběh změn teplot na protiproudém výměníku 20

Obr. 2.9–Tepelná soustava 27

Obr. 2.10–Průběh teplot na výměníku (soubor „01.mat“, rovnice (8) a (9)) 29

Obr. 2.11–Průběh teplot na výměníku (soubor „01.mat“, rovnice (10)) 30

Obr. 2.12–Průběh teplot na výměníku (soubor „01.mat“, rovnice (14)) 30

Obr. 3.1–Regulace TUV 33

Obr. 3.2–Simulovaný odběr TUV 34

Obr. 3.3–Teplota TUV 36

Obr. 3.4- Odběry vody 37

Obr. 3.5–Rozhodování o změně zesílení 38

Obr. 3.6–Zvýšení zesílení 39

Obr. 3.7-Snížení zesílení 40

Obr. 3.8–Srovnání regulátorů (zimní provoz) 41

Obr. 3.9–Srovnání regulátorů (letní provoz) 42

Obr. 4.1-Komunikace mezi programy *43*

Obr. 4.2–Srovnání regulátoru implementovaného v Matlabu a PLC *45*

Obr. 8.1-Průtoky (100°C) ..... *iv*

Obr. 8.2-Teploty TUV (100°C) ..... *iv*

Obr. 8.3-Průtoky (90°C) ..... *v*

Obr. 8.4-Teploty TUV (90°C) ..... *v*

Obr. 8.5-Průtoky (80°C) ..... *vi*

Obr. 8.6-Teploty TUV (80°C) ..... *vi*

Obr. 8.7-Průtoky (70°C) ..... *vii*

Obr. 8.8-Teploty TUV (70°C) ..... *vii*

Seznam tabulek

Tab. 1.1– Charakteristiky výtoků 6

Tab. 1.2– Spotřeba TUV pro 1 osobu a den v bytovém objektu 7

Tab. 1.3– Součinitel současnosti pro bytové objekty 7

Tab. 2.1– Přesnost soustavy 28

Tab. 2.2– Ověření přesnosti modelu soustavy 31

Úvod:

Úkolem diplomové práce je najít vhodné řešení regulace teploty výměníkové stanice teplé užitkové vody. Stanice TUV[1] se dnes sestavují především z deskových protiproudých výměníků, které vynikají svojí vysokou účinností, rychlostí předání tepla a malými rozměry potřebnými pro zástavbu do stanice. Bohužel vysoká účinnost a malý objem akumulované vody s sebou přinášejí také nevýhody, například větší citlivost na usazování vodního kamene na teplosměnných plochách oproti akumulačním výměníkům. Tomu se dá zabránit například úpravou používané vody nebo použitím výměníku z hladkých tvarovaných nerezových desek.

Hlavní nevýhoda je paradoxně spojena s vysokou účinností. Pokud totiž dojde ke změně odběru TUV, dojde také ke změně přítoku studené vody do výměníku a tato změna se takřka okamžitě projeví na výstupní teplotě TUV. Na tom nám nejvíce vadí pokles odběru TUV, protože při něm dochází k prudkému nárůstu teploty TUV, což může způsobit až opaření odběratelů. Tomuto jevu se dá pouze obtížně zabránit, protože odebírání tepla z nahřáté soustavy je nemožné z důvodu vyšší teploty primárního média. K chlazení soustavy dochází jen díky energii vyzářené do okolí, těmto ztrátám se ale obvykle bráníme tepelnou izolací. Jedinými dvěma možnostmi, jak zamezit teplotním výkyvům jsou: okamžitá změna průtoku na primární straně a zvětšení objemu vody v celé soustavě. Proto se na výstup deskového výměníku připojuje samostatná akumulační nádrž, která je schopná tyto výkyvy teploty tlumit.

Řešení této diplomové práce by mělo nabídnout možnost řízení výměníkové stanice TUV bez akumulační nádrže s omezenými výpočetními prostředky řízení. Celý algoritmus řízení by měl být nenáročný na výpočetní

[1] Teplá užitková voda

možnosti řídícího systému, protože pro řízení by měl být použit jeden z typů kompaktních řídících systémů firmy Teco Kolín.

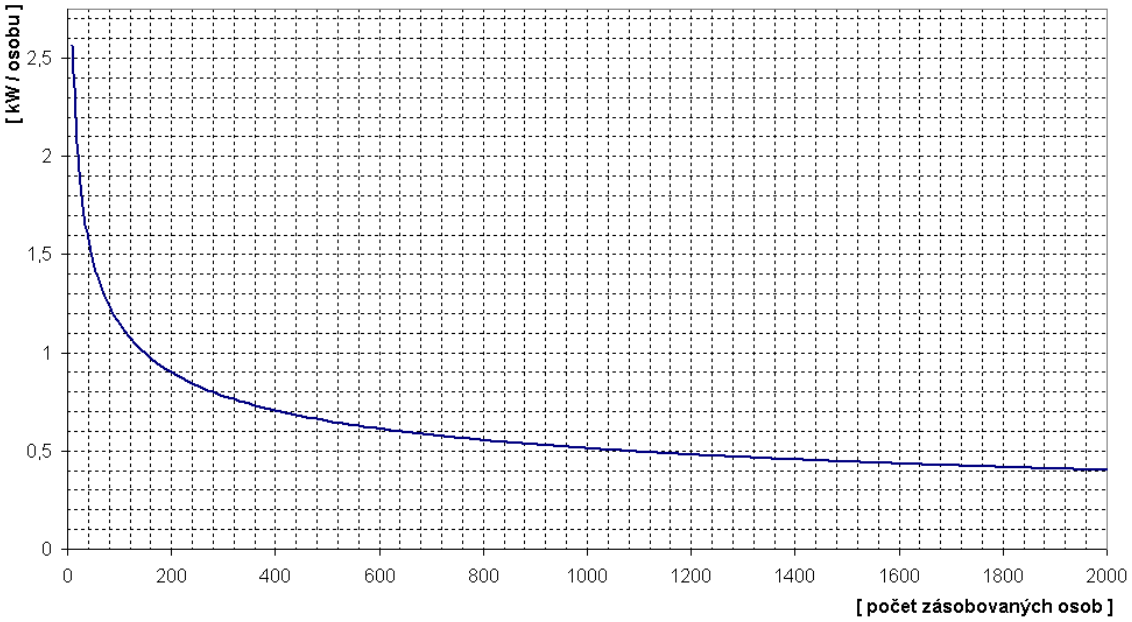
Kapitola 1

1 Vlastnosti výměníkových stanic

1.1 Spotřeba TUV

Pro správnou funkci výměníkové stanice je nutné znát velikost odběrů TUV a zajistit dostatečně výkonný zdroj tepla pro primární stranu výměníkové stanice.

Primární zdroj tepla bývá zajištěn připojením k centrálnímu zásobování teplem, případně připojením k vlastnímu zdroji tepla v kotelně. V obou případech předpokládáme možnost dostatečně dimenzovaného připojení k tomuto zdroji, a proto se dále budeme zabývat pouze dimenzováním výměníkové stanice.



Obr. 1.1-Měrný výkon na osobu

Pro dimenzování je nutné dopředu odhadnout měrný výkon spotřebovaný jedním člověkem. Tento výkon klesá s počtem odběratelů,

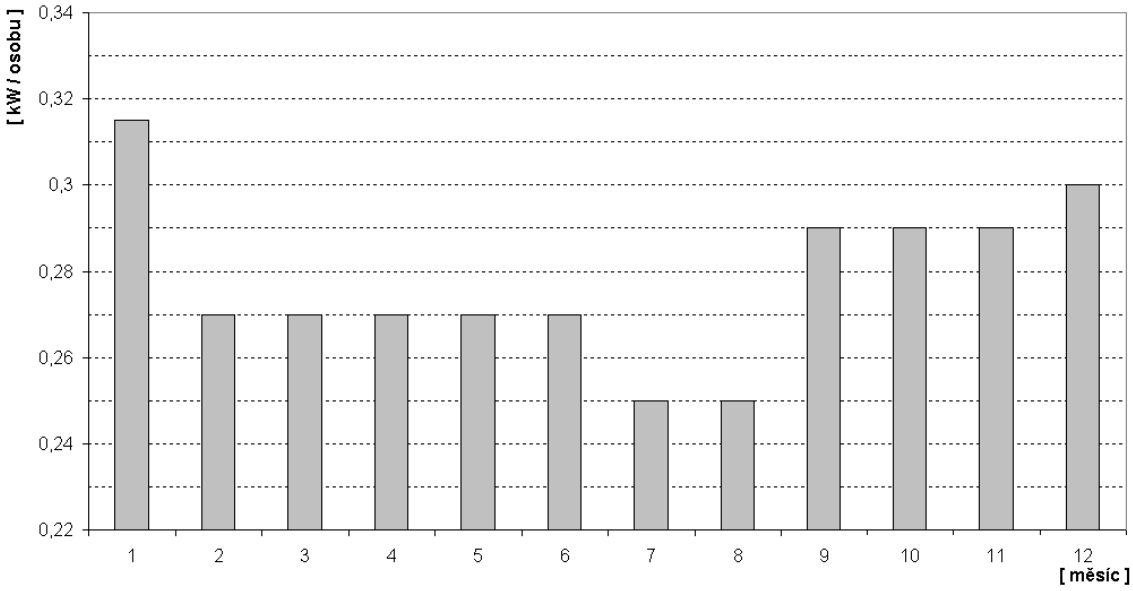
protože s množstvím odběratelů stoupá rovnoměrnost rozdělení odběrů v čase. Tento jev je jasně vidět na obr. 1.1, který lze popsat vztahem :

$$\dot{q} = 5.75\, p^{-0.35} \qquad (1)$$

$\dot{q}$ je měrný příkon a p je počet odběratelů.

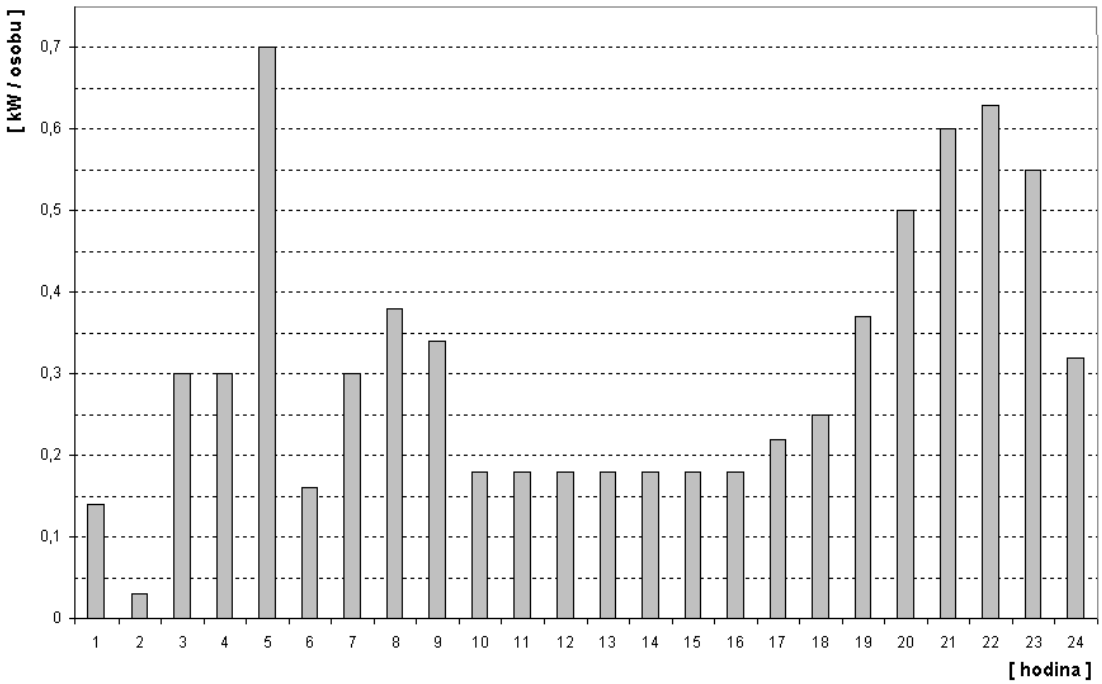
V [1] jsou kromě této závislosti uvedené i další získané z různých zdrojů např. z tepláren a elektráren. Všechny uvedené závislosti se svým tvarem velice podobají a popisují výkon potřebný na jednoho obyvatele při akumulačním způsobu ohřevu.

Pro odhad předpokládané spotřeby TUV při průtočném způsobu ohřevu je nutné znát vývoj spotřeby TUV v čase.



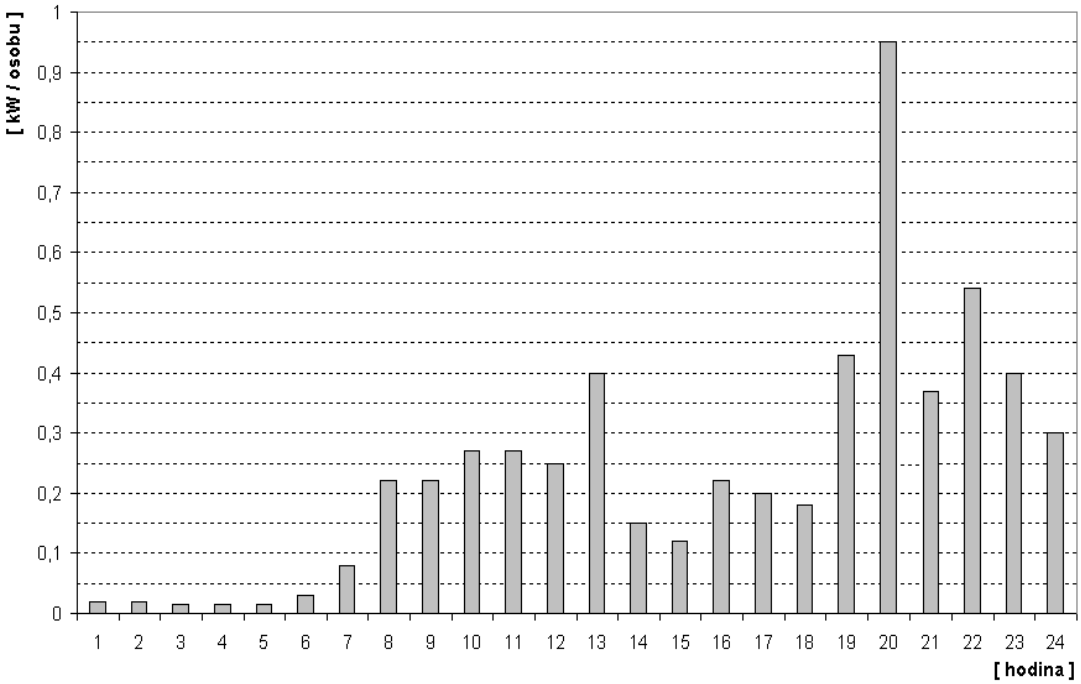
Obr. 1.2–Potřebný výkon pro ohřev TUV během roku

Na obr. 1.2 je vidět vývoj spotřeby TUV během celého roku. Ale ani představa, kterou si lze udělat na základě tohoto grafu, není dostačující pro odhadnutí potřebného výkonu stanice. K tomu potřebujeme další upřesňující data. Podle normy ČSN 06 0320 popisující zásady pro návrh a projektování ohřevu užitkové vody se okamžitý potřebný tepelný výkon pro ohřev TUV stanoví dle určujících výtoků. V případě znalosti skutečného průběhu odběru TUV se dimenzuje zařízení podle tohoto průběhu.



Obr. 1.3-Potřebný výkon pro ohřev TUV ve všední den

Na obr 1.3 je možno pozorovat závislost měrného výkonu na čase v pracovní den, ale ani tento průběh nám nedá ucelený obraz o velikosti potřebné energie.



Obr. 1.4 – Potřebný výkon pro ohřev TUV v neděli

Na průbězích dříve uvedených grafů můžeme pozorovat závislost odebírané energie na čase. Jde z nich poznat, kdy chodí většina lidí spát, kdy

vstávají. Na spotřebě TUV se dokonce projevuje i mytí nádobí po nedělním obědě. Proto není snadné určit potřebný výkon na jednoho odběratele, obzvlášť když je statistika spotřeby, včetně výše uvedených grafů, uváděna pro zařízení o 3000 obyvatel. V [1], odkud jsou grafy převzaty, je uvedeno, že průměrná spotřeba TUV v ČR je $96\,l$ vody 55°C na jednoho obyvatele a den, což odpovídá potřebné energii $5\,kWh$.

V [2], kterou se budeme dále řídit, protože nebyla dodána upřesňující data, je postup dimenzování výkonu průtokového ohřívače popsán následovně.

Parametr	Značka	Jednotka	Baterie			
			umy-vadlo	dřez	sprcha	vana
Teplota na výtoku	t_4	°C	40	55 – 80 [1)]	40	40
Průtok vody o teplotě t_4 na výtoku	U_V	$dm^3\,s^{-1}$	0,06	0,08	0,095	0,2
		$m^3\,h^{-1}$	0,21	0,3	0,34	0,7
Přítok TUV 55°C do výtoku	U_o	$dm^3\,s^{-1}$	0,04	0,08	0,065	0,13
		$m^3\,h^{-1}$	0,14	0,3	0,23	0,47
Tepelný výkon přítoku TUV	q_V	kW	7,3	15,7 – 24,4	12	24,6

[1)] Pouze pro sterilizaci nádobí

Tab. 1.1– Charakteristiky výtoků

Tabulka 1.1 je používaná pro zjištění určujících výtoků baterií osazených v bytě (výtok s největším průtokem a největším objemem dávky z výtoků). Znalost těchto dat je nutná pro určení odběrů TUV a tím pro výkonové dimenzování výměníku při průtočném způsobu ohřevu.

Parametr	Značka	Jednotka	Baterie			
			Umyvadlo	dřez	sprcha	vana
Počet dávek	n_d		3	0,8	1	0,3
Objem dávek	V_d	m^3	0,03	0,002	0,025	0,025
Teplo v dávkách	E_d	kWh	1,5	0,1	1,3	1,4
Součet objemu dávek	V_{2P}	m^3	0,082			
Součet tepla v dávkách	E_{2t}	kWh	4,3			

Tab. 1.2– Spotřeba TUV pro 1 osobu a den v bytovém objektu

Počet bytů n_b	10	50	100	150	200	250
Součinitel současnosti s	0,85	0,41	0,28	0,24	0,21	0,2

Tab. 1.3– Součinitel současnosti pro bytové objekty

Tabulka 1.2 udává teoretickou spotřebu tepla na ohřev užitkové vody pro 1 osobu za den. Těchto údajů se využívá při dimenzování výměníků a akumulační nádrže pro akumulační ohřev TUV. Přesný postup dimenzování je popsán v [2].

Tabulka 1.3 nám popisuje součinitel současnosti odběru, který udává pravděpodobnost maximálního odběru při daném počtu bytů.

Tabulky 1.1 a 1.3 využijeme pro návrh výměníku pro průtočný způsob ohřevu. Postup je následující :

1. Nejprve musíme zjistit počet bytů, které budeme zásobovat TUV
2. Z tabulky 1.3 zjistíme koeficient současnosti pro počet zásobovaných bytů
3. Dosazením do vztahu $$Q_{1n} = s \sum \left(n_V \; q_V \right) \qquad (2)$$

   zjistíme tepelný výkon ohřívače.

1.2 Vliv kvality vody

Za teplou užitkovou vodu je v normě [2] považována ohřátá pitná voda, která ale není určená k pití nebo vaření. Proto všechny následující údaje vycházejí z vlastností pitné vody.

Následující údaje byly získány v [1]. Pitná voda má průměrnou roční teplotu 10°C, při jejím ohřívání na 55°C dochází k vylučování látek v ní obsažených, pohlcených plynů a vápenatých a hořečnatých solí, které jsou udržovány v rovnováze s kyselinou uhličitou.

Při postupném ohřívání vody již nestačí původní množství kyseliny uhličité k udržení minerálů v rozpustném stavu a ty krystalizují. V nejteplejších místech se též vylučuje uhličitan vápenatý a částečně nerozpustný mangan. Všechny tyto produkty ulpívají na teplosměnných plochách tím více, čím je jejich teplota vyšší a povrch drsnější. Z tohoto důvodu dochází ke snižování účinnosti výměníku a ucpávání rozvodného potrubí. Při ohřevu vody se také uvolňují plyny, které korozívně napadají ocel.

Oba tyto pochody tedy snižují účinnost a životnost výměníků, proto je nutné dodržovat maximální teplotu TUV na 60°C. V rozmezí teplot 40-60°C korozní rychlost roste lineárně s teplotou, nad 60°C dochází k rychlejšímu růstu a ten vrcholí při 80°C.

Je několik způsobů ochrany zařízení před těmito účinky:

1. dekarbonizace vápnem
2. dekarbonizace H_2SO_4
3. úprava katexem v sodíkovém cyklu
4. dekarbonizace katexem ve vodíkovém cyklu
5. dekarbonizace slabě kyselým katexem
6. dekarbonizace anexem
7. dávkování polyfosfátů
8. magnetická úprava vody

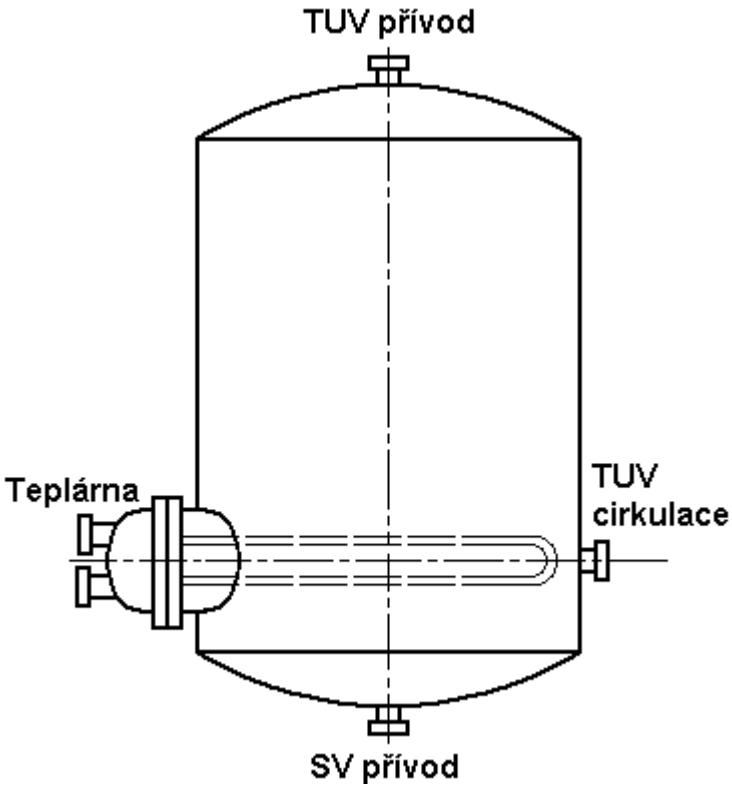
Metody 1 až 7 vyžadují při použití pro úpravu TUV odborný chemický dozor a jsou nákladné. Proto se obvykle používá magnetická úprava vody, kdy po průchodu vody silným magnetickým polem nemohou produkty karbonátové tvrdosti ani po zahřátí tvořit krystaly a nadále po určitou dobu zůstávají v amorfní formě. Přesto nelze převzít záruku za 100% funkčnost magnetické úpravy, protože jsou případy, kdy se ukázala být neúčinná. Magnetická úprava je účinná pro paramagnetické krystaly, které se v magnetickém poli stejnosměrně zorientují, takže se odpuzují a neshlukují se do větších celků.

Při použití této úpravy všechny látky ve vodě zůstávají a v případě použití akumulačního způsobu ohřevu se usazují na dně zásobníku. Proto je nutné zásobník TUV občas odkalovat v nejnižším místě. Přívod vody do zásobníku musí být umístěn tak, aby přiváděná voda nevířila usazené kaly.

Vodu prošlou magnetickou úpravou je možno nadále považovat za vodu měkkou, která působí korozní poškození železných částí soustavy např. výměníku či potrubí. Tomu se bráníme použitím výměníků s deskami z nerezové ocele a rozvodů z plastových trubek.

Dále je doporučováno do okruhu TUV zařadit filtry mechanických nečistot, které brání průtoku hustších kalů a usazování inkrustů ve výměníku. Samozřejmě že zanesený filtr brání i průtoku vody, ale je jednodušší čistit filtr po vyjmutí průplachem, než čistit výměník chemickou cestou.

1.3 Stanice s akumulačním výměníkem



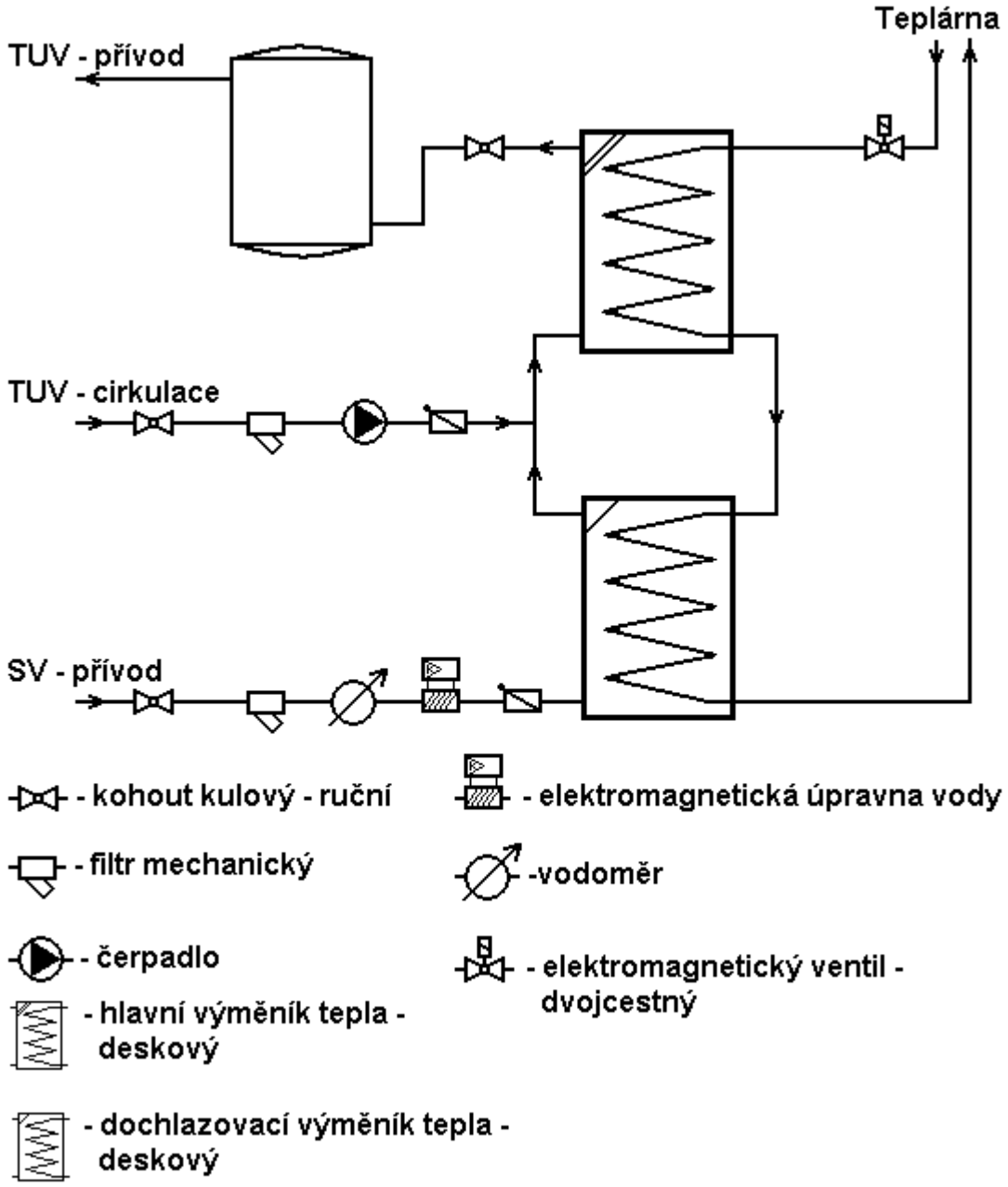
Obr. 1.5-Akumulační ohřívák

Ve stanicích TUV se dnes nejvíce používají, deskové výměníky, v menší míře i výměníky akumulační. Jak je vidět na obr. 1.5, akumulační výměník má výrazně větší objem než je třeba pro samotnou funkci předání tepla. Tento zvětšený objem vody umožňuje akumulovat ohřátou TUV v době malého odběru, v době velkého odběru se energie uchovaná v ohřáté vodě předává odběratelům, přičemž dochází k pomalému poklesu teploty předávané vody. Tato vada je sice velice nepříjemná pro lidi využívající tento způsob ohřevu, obzvlášť, když se všichni uživatelé začnou sprchovat ve stejnou dobu, typicky v neděli večer (obr.1.4). Ale na druhou stranu využití akumulačního ohřevu umožňuje instalovat stanici s nižším špičkovým předávacím výkonem, využít pomalejší ventily a taktéž přesněji regulovat teplotu TUV.

K těmto vlastnostem ještě přistupuje doporučení, předepsané normou [2] a upřesněné hygienickou vyhláškou [4], pro zabránění bakteriologického zamoření rozvodu TUV (např. Legionelly pneumophily). Je doporučen periodický ohřev TUV na minimálně 70°C v místě odběru a zajištění odběrů ze všech odběrných míst. Pokud toto není splněno, má být v nutných případech zajištěna dezinfekce TUV.

1.4 Stanice s deskovým výměníkem

Dnes se do výměníkových stanic používají především deskové výměníky, a to pro jejich výhody, které již byly popsány v úvodu. Akumulace a stabilizace teploty se děje u deskových výměníků přidáním samostatné akumulační nádrže, která sice zjednodušuje regulaci, ale zvyšuje pořizovací náklady na stanici.



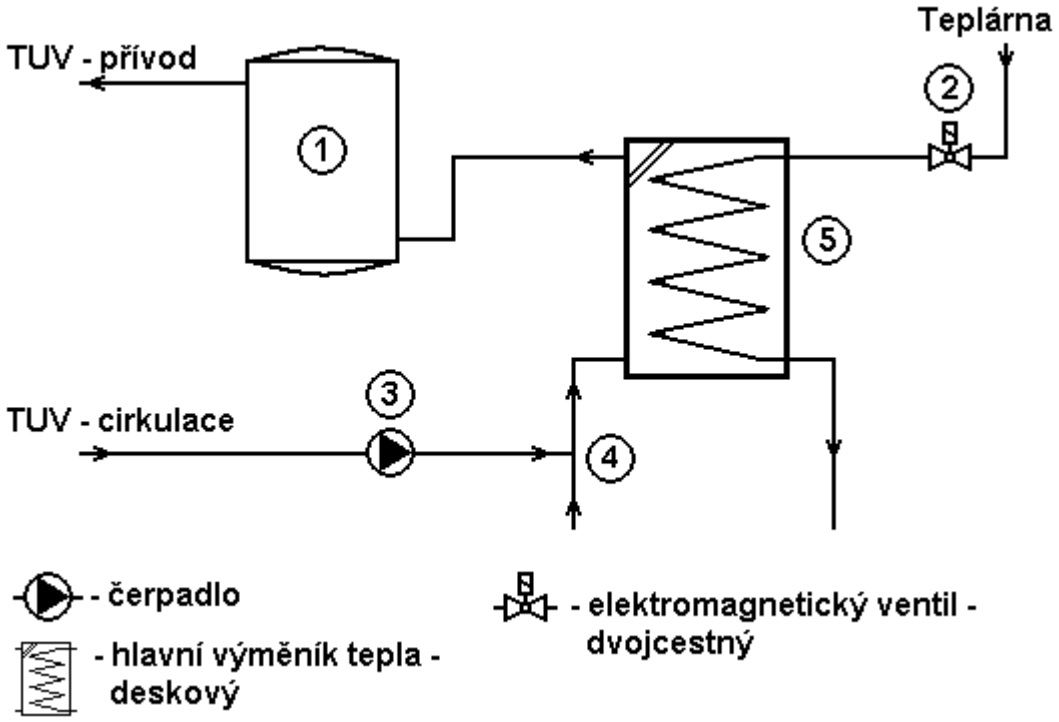
Obr. 1.6-Výměníková stanice s akumulační nádrží

Například 400 litrová nádrž, která se volí, pokud je v okruhu TUV zařazeno 25 bytů, stojí 19 000 Kč [3]. Tyto náklady na nádrž, která není nutná pro samotnou funkci výměníkové stanice, vedou ke snaze vytvořit návrh na stanici bez akumulační nádrže, a tím tedy bez nutnosti výše popsaného periodického zvyšování teploty. Pokud nepoužijeme akumulační nádrž, mluvíme o tzv. *průtočném ohřevu*. Při průtočném ohřevu však stoupají nároky na rychlost regulačního ventilu, kvalitu rozvodu TUV (průchodnost cirkulačního potrubí) a kvalitu vody.

Kapitola 2

2 Model výměníkové stanice

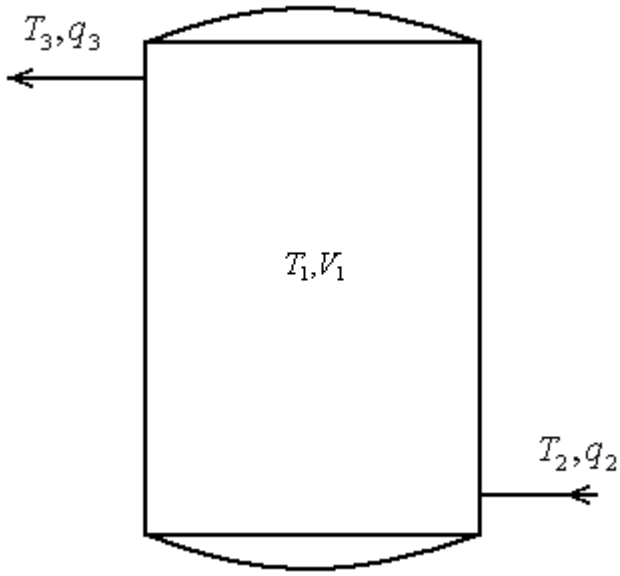
Model výměníkové stanice se skládá z několika dílčích modelů jednotlivých komponentů. Na základě pramenů [1], [2], [3] a [5] byla nakonec zvolena následující struktura jejich propojení.



Obr. 2.1-Struktura modelu výměníkové stanice

Na obr. 2.1 je struktura výměníkové stanice určené pro dvoustupňový ohřev vody. Akumulační nádrž byla do modelu přidána pouze pro porovnání vlastností akumulačního a průtočného způsobu přípravy TUV .

2.1 Model akumulační nádrže



Obr. 2.2–Akumulační nádrž

Na obr. 2.1 je k výměníku sériově připojena nádrž na TUV.

Jedná se o tlakovou nádrž o objemu 300 litrů, jejíž hlavní funkce není v tomto případě akumulovat TUV z důvodu nedostatečného výkonu výměníku, ale zpomalovat celou dynamiku soustavy. Tímto zpomalením je možno dosáhnout snížení rozkmitu teploty TUV.

Při vytváření modelu nádrže jsme vycházeli ze zákona zachování energie :

$$Q_1(k+1)=Q_1(k)+Q_2(k)-Q_3(k), \tag{3}$$

potom po dosazení

$$V_1\,\rho c T_1(k+1)=V_1\,\rho c T_1(k)+q_2(k)\,\rho c T_2(k)-q_3(k)\,\rho c T_3(k),$$

$$V_1 T_1(k+1)=V_1 T_1(k)+q_2(k)\,T_2(k)-q_3(k)\,T_3(k),$$

můžeme předpokládat $T_3=T_1$ potom,

$$V_1 T_1(k+1)=T_1(k)\left[V_1-q_3(k)\right]+q_2(k)\,T_2(k),$$

taktéž je možno předpokládat $q_3=q_2$,

$$V_1 T_1(k+1)=T_1(k)\left[V_1-q_2(k)\right]+q_2(k)\,T_2(k)$$

a konečně

$$T_1(k+1)=\frac{T_1(k)\left[V_1-q_2(k)\right]+q_2(k)\,T_2(k)}{V_1} \tag{4}$$

Jednotlivé symboly znamenají:

Q_1 - teplo nádrže $[J]$ Q_2 - teplo přítoku $[J]$

Q_3 - teplo odtoku $[J]$ V_1 - objem nádrže $[m^3]$

ρ - hustota vody $[kg\,m^{-3}]$ c - měrná tepelná kapacita vody $[kJ\,kg^{-1}]$

T_1 - teplota vody v nádrži $[K]$ T_2 - teplota vody na přítoku $[K]$

T_3 - teplota vody na odtoku $[K]$

q_2, q_3 - průtok sekundární stranou hlavního výměníku $[m^3\,s^{-1}]$

2.2 *Model ventilu*

Ventil je na obr. 2.1 označen číslem 2. Pro kvalitní regulaci bez akumulační nádrže musíme zvolit ventil s malou dobou přeběhu.

U běžných kulových ventilů s elektrickým pohonem se u nejrychlejších ventilů pohybuje doba přeběhu okolo 40 sekund. Tyto ventily jsou pro nás příliš pomalé. U nejrychlejších ventilů s elektrohydraulickým pohonem se tato doba pohybuje okolo 20 sekund a ani tento typ ventilů pro nás nemá dostatečnou rychlost. Proto nám nezbývá jiná možnost než použít ventil magnetický.

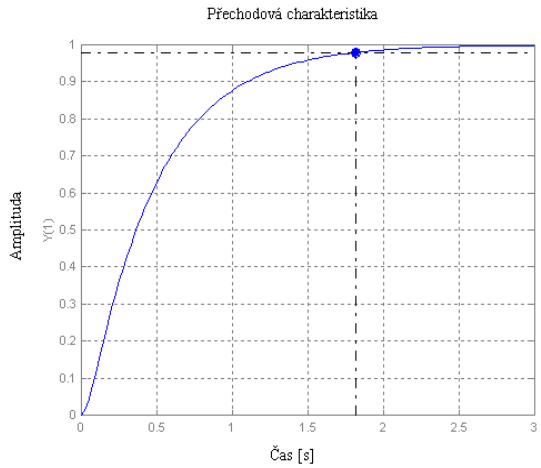
Magnetické ventily dosahují doby přeběhu menší než dvě sekundy, jsou vybaveny havarijní funkcí, při poklesu napájení se uzavřou. Lze u nich zvolit, jestli vztah mezi průtokem a řídicí veličinou bude mít lineární nebo ekviprocentní průběh. Pro zjištění polohy disponují indukčním odměřováním polohy. U ventilu lze zapnout funkci, při které ventil sám zjišťuje, zda aktuální poloha odpovídá skutečné. Pokud neodpovídá, sám polohu opraví bez vnějšího zásahu. To umožňuje dosáhnout dobré linearity. Další výhodou ventilů je provoz bez pravidelných prohlídek.

Model byl vytvořen tak, aby měl shodné chování jako skutečný ventil. To znamená: výstup regulátoru udává požadovanou změnu polohy ventilu. Ta je

přičtena k aktuální poloze. Tento součet slouží jako vstupní proměnná modelu ventilu (tímto je zajištěna integrační složka ventilu, který je ovládán řízením polohy) Výstupní proměnná modelu odpovídá skutečné aktuální poloze ventilu. Jako model ventilu byla zvolena soustava druhého řádu s tímto přenosem:

$$S(s) = \frac{50}{s^2 + 25s + 50}, \tag{5}$$

která byla pro účely použití v simulaci stanice diskretizována.



Obr. 2.3–Přechodová charakteristika modelu ventilu

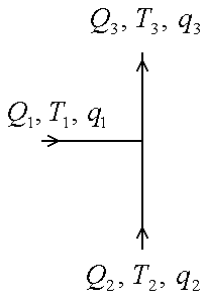
Na obr. 2.3 je zobrazena přechodová charakteristika soustavy (5), která odpovídá modelu ventilu. Doba ustálení této soustavy je 1,81 sekundy, což odpovídá katalogové době přeběhu ventilu PN16 s pohonem MXG461B20, která je udávaná jako menší než dvě sekundy [6].

Dále v modelu předpokládáme využití lineární charakteristiky ventilu.

2.3 *Model čerpadla*

Cirkulační čerpadlo je na obr. 2.1 označeno číslem 3. U čerpadel ve výměníkových stanicích TUV bývá pevně nastaveno množství přečerpávané kapaliny. Tím je sice omezena možnost regulace, ale zároveň to regulaci zjednodušuje, protože se nemusíme starat o optimální nastavení průtoku vody v cirkulačním okruhu. V našem modelu je cirkulační průtok nastaven na $0{,}45\,ls^{-1}$, což odpovídá 33% předpokládaného maximálního průtoku výměníkem. Podle [1] by měl být cirkulační průtok nastaven na 42% celkového množství vystupujícího z výměníku.

2.4 *Model směšování*



Obr. 2.4-Směšování

Dále bude popisováno směšování vody o různých teplotách. Na obr. 2.1 je toto místo označeno číslem 4. Při výpočtu předpokládáme dokonalé promíchání vody z cirkulační větve a vody přitékající ze sekundární strany dochlazovacího výměníku. Na obr. 2.4 jsou znázorněny veličiny tak, jak budou užívány při následujícím odvození.

Při odvození bylo použito zákonu zachování energie.

$$Q_3(k+1) = Q_2(k) + Q_1(k),$$

$$q_3(k+1)\rho c T_3(k+1) = q_2(k)\rho c T_2(k) + q_1(k)\rho c T_1(k),$$

$$q_3(k+1)T_3(k+1) = q_2(k)T_2(k) + q_1(k)T_1(k),$$

$$T_3(k+1) = \frac{q_2(k)T_2(k) + q_1(k)T_1(k)}{q_3(k+1)}.$$

Při předpokladu: $q_3(k+1) = q_2(k) + q_3(k),$

$$T_3(k+1) = \frac{q_2(k)T_2(k) + q_1(k)T_1(k)}{q_2(k) + q_1(k)} \qquad (6)$$

Význam jednotlivých symbolů v předchozích vztazích:

Q_3 - teplo na přítoku sekundární strany hlavního výměníku $[J]$

Q_2 - teplo na výtoku sekundární strany dochlazovacího výměníku $[J]$

Q_1 - teplo cirkulace $[J]$

q_3 - průtok sekundární stranou hlavního výměníku $[m^3\, s^{-1}]$

q_2 - průtok sekundární stranou dochlazovacího výměníku $[m^3\, s^{-1}]$

q_1 - průtok cirkulace $[m^3\, s^{-1}]$

ρ - hustota vody $[kg\, m^{-3}]$

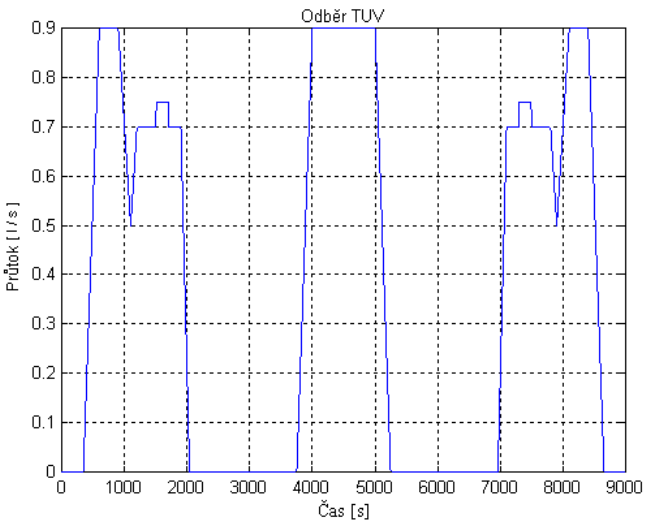
c - měrná tepelná kapacita vody $[kJ\, kg^{-1}]$

T_3 - teplota na vstupu sekundární strany hlavního výměníku $[K]$

T_2 - teplota na výstupu sekundární strany dochlazovacího výměníku $[K]$

T_1 - teplota cirkulace $[K]$

2.5 *Model odběrů*



Obr. 2.5-Odběr TUV

Protože funkci výměníkové stanice nelze ověřit bez modelu odběrů, museli jsme vytvořit i model odběrů TUV. Tento model byl vytvořen tak, že jsme vytvořili křivku odběrů. Tyto odběry se mění v čase od minimální hodnoty průtoku do maximální předpokládané hodnoty.

Ještě jsme museli vytvořit model pro teplotu vody vracející se od odběratelů. Pomocí [2] jsme určili teplotu vratné vody cirkulačního okruhu na 50°C při ustálené výstupní teplotě 55°C. Odchylky od žádané výstupní teploty se po průtoku vody cirkulačním potrubím přičítají 80% ke stabilní teplotě vratné vody cirkulačního okruhu.

$$T_c(k+1) = 273.15 + 50 + 0.8\left(T_1(k-i) - 55 - 273.15\right),$$

kde i spočítáme jako $$i = \frac{\pi r^2 l}{q_1}.$$

Význam jednotlivých symbolů v předchozích vztazích :

T_c - teplota vratné vody cirkulačního potrubí $[K]$

T_1 - výstupní teplota TUV $[K]$

i - čas potřebný pro průtok vody z výstupu výměníku do vyústění cirkulačního potrubí

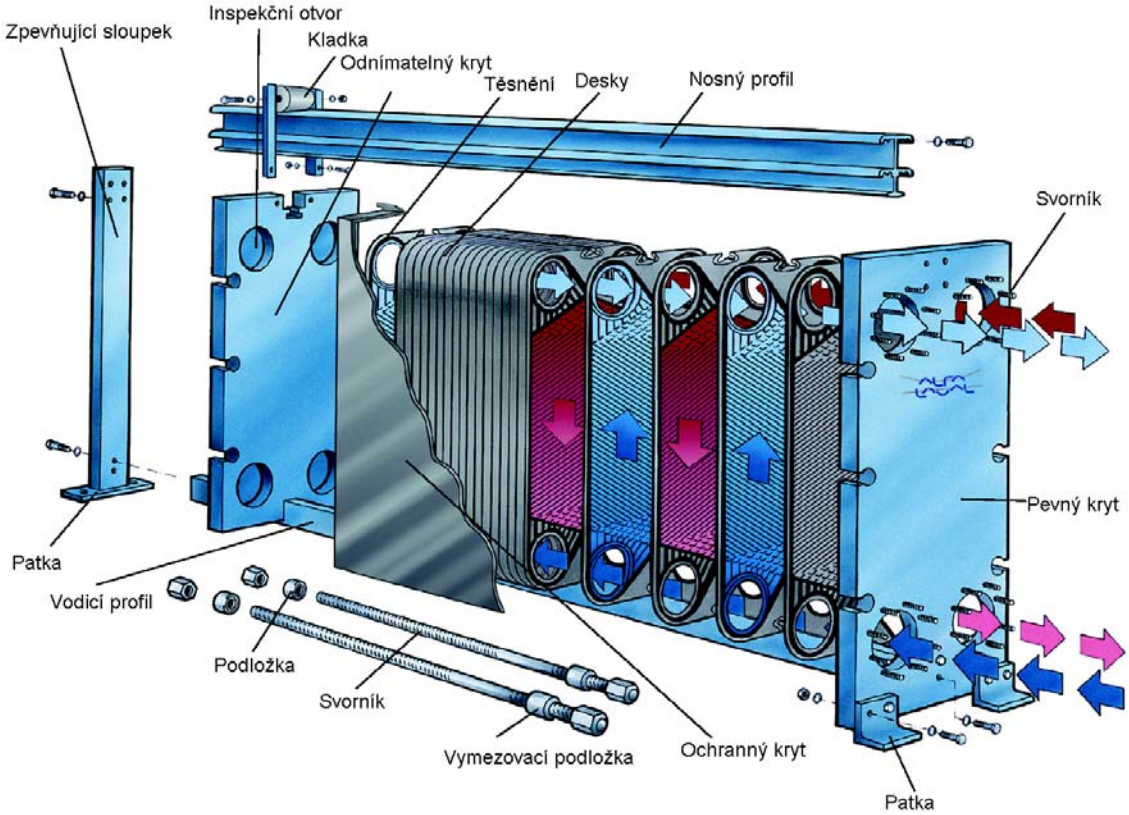
r - poloměr cirkulačního potrubí $[m]$

l - délka cirkulačního potrubí $[m]$

q_1 - aktuální průtok cirkulačním potrubím $[m^3 s^{-1}]$

2.6 *Model deskového výměníku*

Základem výměníku jsou nerezové desky s vylisovanými kanály. Mezi desky je vloženo těsnění a poté jsou desky sešroubovány. Na obr. 2.6 [7] je zobrazen tento způsob složení výměníku. Jiný způsob upevnění desek k sobě je pájení.

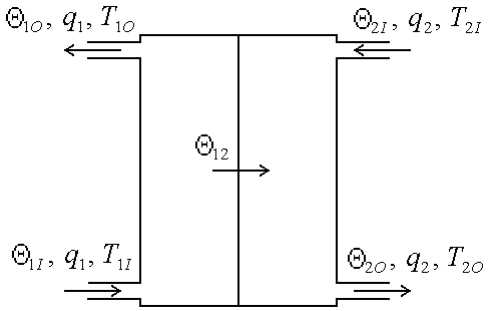


Obr. 2.6–Deskový výměník [7]

Spojením desek se vytvoří systém kanálků, kterými proudí různá média. Složení výměníku dnes provádí firma, od které výměník objednáváme. Zákazník v objednacím listě uvede, pro jaký výkon má být dimenzován, s jakými médii bude pracovat, jaké tlaky lze očekávat, jaká tlaková ztráta je povolena a samozřejmě předpokládané pracovní teploty. Výsledkem tohoto postupu je, že celý výměník je optimalizován na co největší účinnost při respektování povolených tlakových ztrát a vlastností média (agresivita).

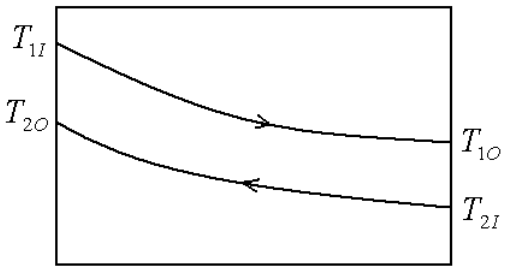
Účinnost deskových výměníků se pohybuje okolo 98%. Při kvalitní izolaci nelze dotekem vůbec poznat, zda výměníkem proudí horká voda,

případně pára. To dnes vede k situaci, kdy se musí do místnosti s výměníkovou stanicí o výkonu stovek kilowattů instalovat radiátor, aby v zimě nedocházelo k prochladnutí místnosti.



Obr. 2.7–Deskový protiproudý výměník

Pro jednoduchost si můžeme výměník představit jako dvě nádoby se společnou teplosměnnou plochou. Rozložené parametry výměníku soustřeďujeme do jednoho bodu. Přes výměník proudí na primární straně ohřívající médium o teplotě T_{1I} a průtoku q_1, toto médium se ochlazuje na teplotu T_{1O}.



Obr. 2.8–Průběh změn teplot na protiproudém výměníku

Sekundární stranou protéká ohřívané médium o teplotě T_{2I} a průtoku q_2, toto médium se ohřívá na teplotu T_{2O}. Ochlazování primárního a ohřívání sekundárního média probíhá díky tepelnému toku Θ_{12}.

Na následujících stránkách budou nyní popsány dva podobné modely deskového výměníku tepla. Oba byly odvozeny ze zákona zachování energie, ale s různým způsobem výpočtu tepelného toku přes teplosměnnou plochu.

2.6.1 Model 1

Při odvozování vycházíme z následujících předpokladů:

$$T_{1I} < T_{2O}, \qquad T_{1O} < T_{2I}$$

Význam proměnných je stejný jako na obr. 2.7 a 2.8

$$\rho c_1 V_1 \frac{dT_{1O}}{dt} = \Theta_{1I} - \Theta_{1O} - \Theta_{12},$$

$$\rho c_2 V_1 \frac{dT_{2O}}{dt} = \Theta_{2I} - \Theta_{2O} + \Theta_{12},$$

Pro výpočet přestupu tepla přes stěnu byl použit vztah:

$$\Theta_{12} = k\,S(\Delta T),$$

kde k je součinitel prostupu tepla přes stěnu, S je plocha teplosměnné stěny a ΔT je teplotní spád mezi primárním a sekundárním médiem.

Pro výpočet teplotního spádu na výměnících by měl být použit *střední teplotní spád logaritmický* [10], $\Delta T = \dfrac{T_{1I} - T_{2O} - T_{1O} + T_{2I}}{\ln \dfrac{T_{1I} - T_{2O}}{T_{1O} - T_{2I}}}$.

Místo logaritmického teplotního spádu jsme použili *střední teplotní spád aritmetický* [10],

$$\Delta T = \frac{T_{1O} - T_{2I}}{2} + \frac{T_{1I} - T_{2O}}{2} \tag{7}$$

Při použití středního teplotního spádu aritmetického místo logaritmického dále předpokládáme, že ve výsledných rovnicích výměníku budeme muset použít opravné koeficienty α a β, které získáme měřením na výměníku a na modelu výměníkové soustavy. Koeficienty budou v sobě zahrnovat i dynamiku výměníku, kterou nejsme schopni popsat (způsobeno turbulentním prouděním na deskách výměníku). Výsledná simulace

výměníkové stanice bude porovnána s výsledky z programu pro návrh výměníků.

Po dosazení za tepelné toky a dosazením (7):

$$\rho c_1 V_1 \frac{dT_{1O}}{dt} = \rho c_1 V_1 T_{1I}\, q_1 - \rho c_1 V_1 T_{1O}\, q_1 - k\, S_1 \left(\frac{T_{1O} - T_{2I}}{2} + \frac{T_{1I} - T_{2O}}{2} \right),$$

$$\rho c_2 V_1 \frac{dT_{2O}}{dt} = \rho c_2 V_1 T_{2I}\, q_2 - \rho c_2 V_1 T_{2O}\, q_2 + k\, S_1 \left(\frac{T_{1O} - T_{2I}}{2} + \frac{T_{1I} - T_{2O}}{2} \right),$$

$$\frac{dT_{1O}}{dt} = T_{1I} \frac{q_1}{V_1} - T_{1O} \frac{q_1}{V_1} - \frac{k\, S_1}{\rho c V_1} \left(\frac{T_{1O} - T_{2I}}{2} + \frac{T_{1I} - T_{2O}}{2} \right) \tag{8}$$

$$\frac{dT_{2O}}{dt} = T_{2I} \frac{q_2}{V_1} - T_{2O} \frac{q_2}{V_1} - \frac{k\, S_1}{\rho c V_1} \left(\frac{T_{1O} - T_{2I}}{2} + \frac{T_{1I} - T_{2O}}{2} \right) \tag{9}$$

Rovnice (8) a (9) můžeme přepsat do maticového tvaru :

$$A = \begin{pmatrix} -\frac{q_1}{V_1} - \frac{k\,S}{\rho c V_1} & \frac{k\,S}{\rho c V_1} \\ \frac{k\,S}{\rho c V_1} & -\frac{q_2}{V_1} - \frac{k\,S}{\rho c V_1} \end{pmatrix} \qquad B = \begin{pmatrix} \frac{q_1}{V_1} - \frac{k\,S}{\rho c V_1} & \frac{k\,S}{\rho c V_1} \\ \frac{k\,S}{\rho c V_1} & \frac{q_2}{V_1} - \frac{k\,S}{\rho c V_1} \end{pmatrix}$$

$$C = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \qquad D = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

S uvažováním koeficientů α a β :

$$A = \begin{pmatrix} -\frac{q_1}{V_1} - \alpha \frac{k\,S}{\rho c V_1} & \alpha \frac{k\,S}{\rho c V_1} \\ \alpha \frac{k\,S}{\rho c V_1} & -\frac{q_2}{V_1} - \alpha \frac{k\,S}{\rho c V_1} \end{pmatrix} \qquad B = \begin{pmatrix} \frac{q_1}{V_1} - \beta \frac{k\,S}{\rho c V_1} & \beta \frac{k\,S}{\rho c V_1} \\ \beta \frac{k\,S}{\rho c V_1} & \frac{q_2}{V_1} - \beta \frac{k\,S}{\rho c V_1} \end{pmatrix} \tag{10}$$

V maticovém zápisu vypadají rovnice (10) takto:

$$\dot{\vec{x}} = A\vec{x} + B\vec{u}$$

$$\vec{y} = C\vec{x} + D\vec{u}$$

$$\vec{x} = \begin{pmatrix} T_{1O} & T_{2O} \end{pmatrix}^T \qquad \vec{u} = \begin{pmatrix} T_{1I} & T_{2I} \end{pmatrix}^T$$

Koeficienty α a β byly zjištěny následovně:

$$\alpha = 6, \qquad \beta = 0{,}4.$$

Velikost koeficientů byla zjištěna empiricky na základě shody naměřených průběhů na tepelné soustavě a na použitém modelu výměníku. Jejich velikost souvisí s průtoky a teplotami na výměníku. Přesnou velikost koeficientů, jejichž velikost závisí na všech teplotách teplonosných médií a průtocích na obou stranách výměníku, lze zjistit změřením vlastností výměníku, jehož model vytváříme. To jsme bohužel nemohli provést. Proto jsme koeficienty α a β nastavili konstantní tak, aby v době, kdy se neodebírá TUV, byla teplota T_{1O} asi o dva až tři stupně vetší než T_{2I} a současně, aby průběhy naměřené na tepelné soustavě odpovídaly průběhům získaným pomocí použitého modelu deskového výměníku. Porovnání hodnot vypočtených modelem s hodnotami získanými z programu na návrh deskových výměníků bude provedeno na konci této kapitoly.

Význam jednotlivých, zatím nepopsaných, symbolů je:

V_1 - objem výměníku; předpokládá se symetrický výměník se stejně velkým objemem primární i sekundární strany $[m^3]$

Θ_1 - teplo na primární straně; podle indexu lze poznat, jestli na vstupní, nebo výstupní straně $[J]$

Θ_2 - teplo na sekundární straně $[J]$

Θ_{12} -tepelný tok přes teplosměnnou plochu $[J]$

2.6.2 Model 2

Dále bude popsán model uvedený v [9]. Při zjednodušených předpokladech bude uvažován příklad lamelového výměníku v protiproudém uspořádání. Popis veličin je stejný jako na obr. 2.7. Odvozována bude rovnice

pro sekundární stranu výměníku, pro primární stranu bude vytvořena až na konci této podkapitoly.

logaritmický teplotní spád:

$$\Delta T = \frac{2T_{1I} - (1+q)T_{2O} - (1-q)T_{2I}}{\ln \frac{T_{1I} - qT_{2O} - (1-q)T_{2I}}{T_{1I} - T_{2O}}} \doteq T_{1I} - 0{,}5(1+q)T_{2O} - 0{,}5(1-q)T_{2I},$$

kde $$q = \frac{q_2}{q_1}.$$ [9]

Takto daným teplotním spádem a koeficientem prostupu tepla stěnou k je dán tepelný tok Θ_{12} předávaný stěnami výměníku $\Theta_{12} = k\,\Delta T$, který odpovídá teplu předanému ohřívané tekutině. Při nerovnováze mezi těmito tepelnými toky se mění celé teplotní pole výměníku. Jestliže bude reprezentováno střední teplotou T_M (na straně primárního média), bude její změna při soustředěné tepelné kapacitě C primárního média dána rovnicí

$$\frac{dT_M}{dt} = \frac{k}{C}\left[T_{1I}(t-\tau_H) - \alpha T_{2O}(t-\tau_M) - \beta T_{2I}(t-\tau_B)\right] - \frac{q_2 c}{C}(T_{2O} - T_{2I}) \qquad (11)$$

kde

$$C = cV\rho \qquad \alpha = \frac{1+q}{2} \qquad \beta = \frac{1-q}{2}$$

V - je objem výměníku

τ_H, τ_B, - vyjádřena nesoučasnost vlivu změn T_{1I} a T_{2I} na změny T_M

τ_M - posuv inflexního bodu přechodového jevu.

Výsledkem činnosti výměníku je teplota T_{2O}, která z T_M vyplývá rovnicí

$$t_S \frac{dT_{2O}}{dt} = T_M - T_{2O} \qquad (12)$$

kde t_S představuje dynamiku zpoždění mezi vnitřní střední teplotou T_M a výstupní T_{2O}. Při konstantních průtocích a malých změnách teploty lze parametry c, k, q_2, T_S považovat za konstantní. Potom je rovnicemi (11) a (12) dán lineární stavový model, jenž je popsán následovně.

$$A = \begin{pmatrix} 0 & -\frac{1}{C}\left[k\alpha \exp(-s\tau_M) + q_2 C\right] \\ \frac{1}{t_S} & -\frac{1}{t_S} \end{pmatrix}, \tag{13}$$

$$B = \begin{pmatrix} \frac{k}{C}\exp(-s\tau_H) & \frac{1}{C}\left[q_2 C - k\beta \exp(-s\tau_D)\right] \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \tag{14}$$

$$\vec{u} = \begin{pmatrix} T_{1I} & T_{2I} \end{pmatrix}^T \qquad \vec{x} = \begin{pmatrix} T_M & T_{2O} \end{pmatrix}^T$$

Při rychlostech proudění ve výměníku můžeme dopravní zpoždění jednotlivých veličin zanedbat, tím se nám rovnice (13) a (14) zjednodušují na:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & -\frac{k\alpha + q_2 C}{C} \\ \frac{1}{t_S} & -\frac{1}{t_S} \end{pmatrix}, \qquad B = \begin{pmatrix} \frac{k}{C} & \frac{q_2 C - k\beta}{C} \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Výstupní teplotu primárního a sekundárního média popisují následující rovnice. Při jejich odvozování bylo využito stejného postupu jako pro odvozování teploty sekundárního média.

$$A = \begin{pmatrix} 0 & -\frac{k\alpha_1}{C} - \frac{c q_1}{C} & 0 & 0 \\ \frac{1}{t_{S1}} & -\frac{1}{t_{S1}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{k\alpha_2}{C} - \frac{c q_2}{C} \\ 0 & 0 & \frac{1}{t_{S2}} & -\frac{1}{t_{S2}} \end{pmatrix} B = \begin{pmatrix} \frac{k}{C} & -\frac{k\beta_1}{C} + \frac{q_1 c}{C} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{k}{C} & -\frac{k\beta_2}{C} + \frac{q_2 c}{C} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$C = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\vec{u} = \begin{pmatrix} T_{1I} & T_{2I} & T_{1I} & T_{2I} \end{pmatrix}^T \qquad \vec{x} = \begin{pmatrix} T_{M1} & T_{1O} & T_{M2} & T_{2O} \end{pmatrix}^T$$

kde

$$\alpha_1 = \frac{1+p_1}{2} \qquad \beta_1 = \frac{1-p_1}{2} \qquad p_1 = \frac{q_1}{q_2}$$

$$\alpha_2 = \frac{1+p_2}{2} \qquad \beta_2 = \frac{1-p_2}{2} \qquad p_2 = \frac{q_2}{q_1}$$

Výsledné rovnice tedy jsou:

$$\begin{aligned} \dot{\vec{x}} &= A\vec{x} + B\vec{u} \\ \vec{y} &= C\vec{x} + D\vec{u} \end{aligned} \tag{15}$$

2.6.3 Zdůvodnění výběru modelu

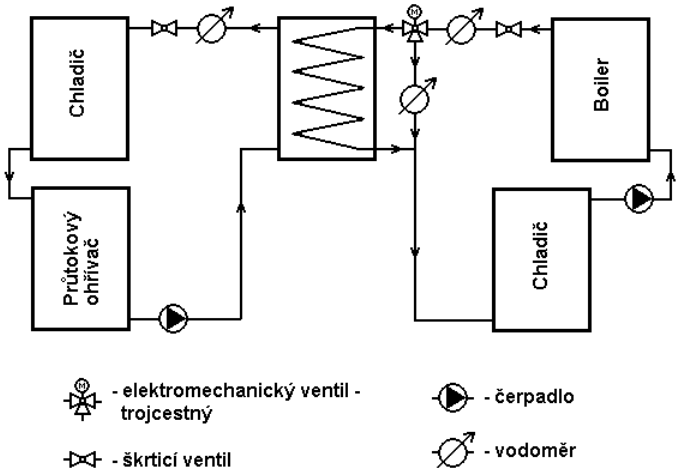
Pro náš model výměníkové soustavy jsme vybrali model popsaný rovnicemi (10). Ten dává přesnější výsledky než model popsaný rovnicemi (15), ke kterému jsme došli po zjednodušení rovnic (14). Pokud bychom použili model s rovnicemi (14), bylo by nutné odhadovat kromě koeficientu prostupu tepla stěnou i parametry dopravního zpoždění a rozdíl mezi střední vnitřní teplotou a výstupní teplotou z výměníku.

I tak jsme byli nuceni pro model výměníkové stanice odhadovat činitel prostupu tepla. Při jeho odhadu jsme vycházeli z vlastností deskového výměníku. Při vzrůstajícím průtoku dochází vlivem tvaru kanálků vedoucích kapalinu k výraznějšímu turbulentnímu proudění a tím i k lepšímu předání tepla. To znamená, že dochází i k nárůstu činitele prostupu tepla. Proto měníme koeficient prostupu tepla lineárně s průtokem a to od hodnoty $k = 3500$ při nulovém odběru TUV do $k = 8000$ při maximálním odběru.

2.6.4 Přesnost modelu

Bohužel jsme nemohli přesnost modelu ověřit na datech ze skutečné výměníkové stanice, protože firma Sting Energo neposkytla data, jak bylo původně plánováno.

I přes vynaloženou snahu získat data z jiného zdroje jsme nebyli úspěšní. Jediné průběhy, které se povedlo získat, byly průběhy teplot, ke kterým nebyly známy průběhy průtoků. I tato data tedy nebyla dostatečná pro ověření přesnosti modelu. Nakonec jsme model deskového výměníku ověřovali na tepelné soustavě Centra aplikované kybernetiky umístěné na Stojní fakultě ČVUT.



Obr. 2.9–Tepelná soustava

V tepelné soustavě je osazen deskový výměník firmy Zilmet o ploše $S = 0{,}066 m^2$ a objemu $V = 0{,}1685 dm^3$. Tepelná soustava je dále osazená průtokovým ohřívačem a boilerem, které umožňují měnit vstupní teploty do výměníku.

Dále jsou na obou stranách soustavy umístěna oběhová čerpadla. Změnu průtoku média umožňují škrticí ventily a větev obtoku. Tuto změnu bohužel nelze při změnách průtoku měřit, protože k měření průtoku slouží pouze klasické průtokoměry s rozlišením 0,1 litru. S touto rozlišovací schopností není možné zachytit změny průtoků. Z tohoto důvodu námi naměřené průběhy mají vždy konstantní průtoky a mění se pouze teploty.

V tabulce 2.1 je vidět, jaké přesnosti jsme dosáhli pro jednotlivé průběhy. Tyto průběhy jsou umístěny na přiloženém CD v adresáři „Průběhy“. V tomto adresáři je umístěn i zdrojový kód programu, který generuje výsledky umístěné v tabulce a grafy, které jsou umístěné za tabulkou. Průběhy jsou v tabulce za sebou umístěny podle toho, v jakém časovém postupu byly měřeny.

soubor	01	02	03	04	05	06	07	08	09
q_1/q_2	0,729	0,788	0,88	0,54	0,47	0,55	0,66	0,637	0,909
Chyba primární strany [°C]	0,14	0,145	0,11	0,091	0,031	0,05	0,034	0,049	0,112
Chyba sekundární strany [°C]	0,086	0,078	0,17	0,096	0,092	0,1	0,114	0,107	0,179

Soubor	10	11	12	13	14
q_1/q_2	0,125	0,3	0,37	0,611	0,588
Chyba primární strany [°C]	0,086	0,066	0,076	0,068	0,093
Chyba sekundární strany [°C]	0,032	0,135	0,115	0,14	0,094

Tab. 2.1– Přesnost soustavy

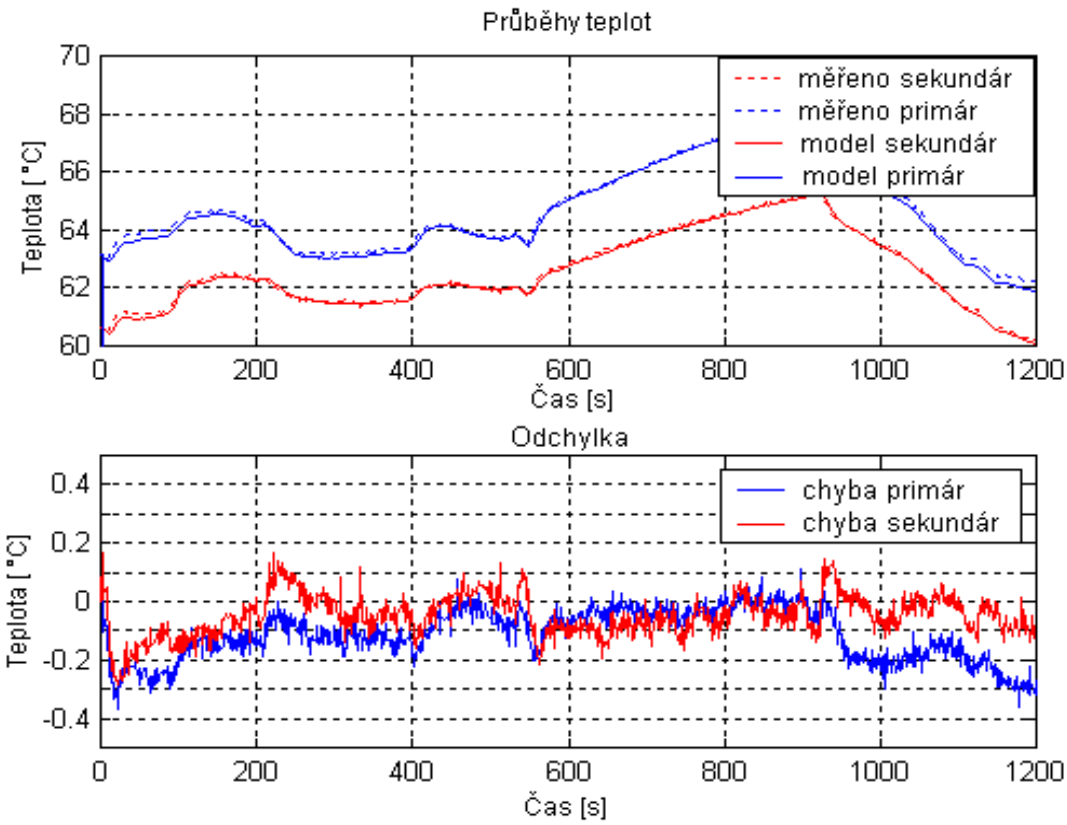
V tabulce 2.1 je vidět, že pro všech 14 průběhů máme chybu menší než 0,2 °C. Tato přesnost je dostatečná pro naše účely.

Výpočet chyby vycházel ze vztahu :

$$\Delta = \frac{1}{n}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(T_s - T_m\right)^2},$$

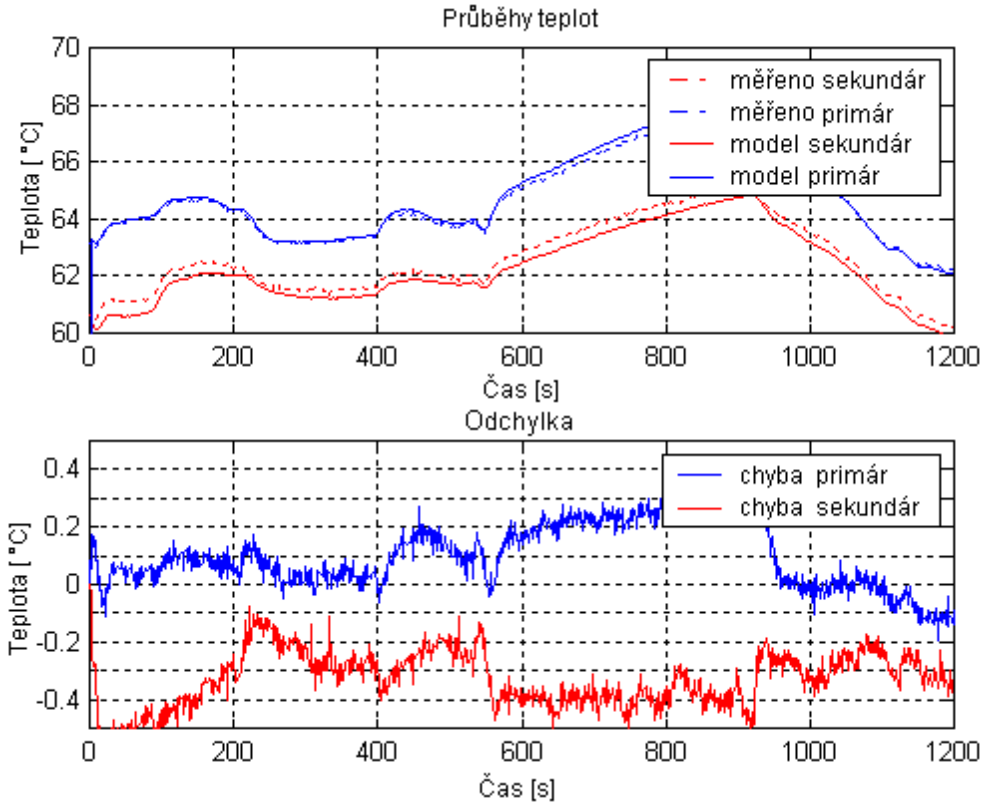
kde n je počet měření, T_s je teplota vypočítaná modelem a T_M je teplota naměřená na výměníku.

Pro úplnost je uveden příklad průběhů a jejich odchylek na obr. 2.10.

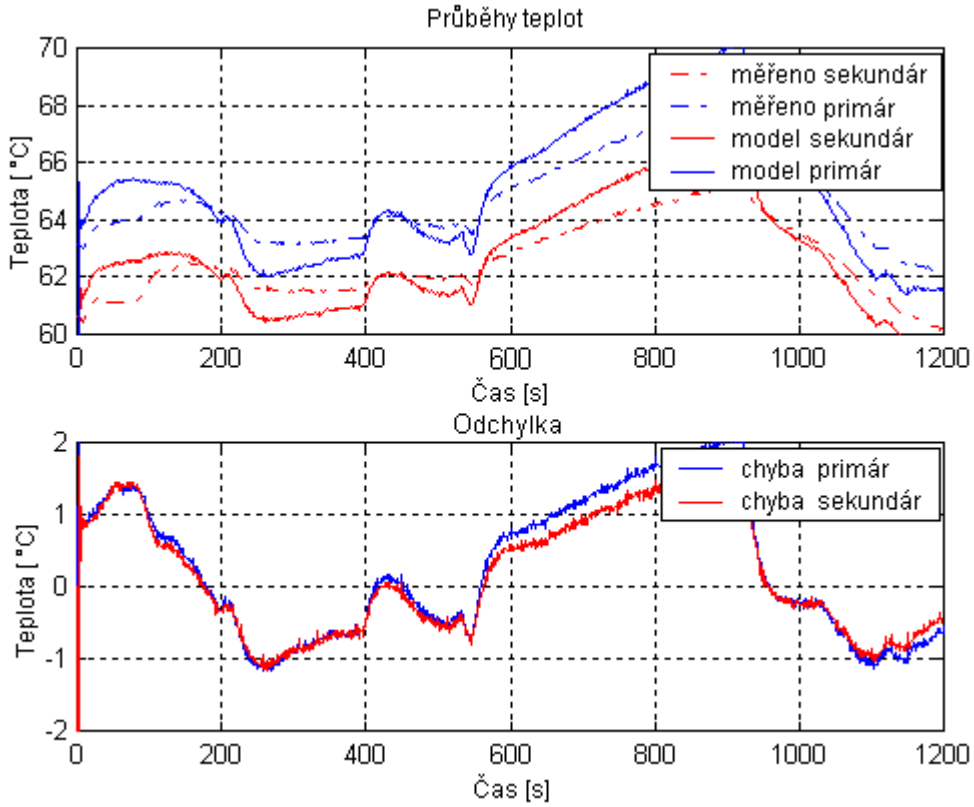


Obr. 2.10–Průběh teplot na výměníku (soubor „01.mat“, rovnice (8) a (9))

Průběh 2.11 byl získán na souboru „01.mat“, pomocí rovnic (8) a (9) na rozdíl od průběhu na obr. 2.10, který byl získán pomocí rovnic (10), které používáme i v modelu výměníkové soustavy. Pokud porovnáme oba průběhy, tak zjistíme, že v dynamických vlastnostech se vzájemně shodují a současně se shodují i s dynamikou skutečného výměníku. Pouze u průběhu na obr. 2.11 je vidět, že model sekundární strany je posunut o 0,3 °C pod skutečně naměřené hodnoty.



Obr. 2.11–Průběh teplot na výměníku (soubor „01.mat“, rovnice (10))



Obr. 2.12–Průběh teplot na výměníku (soubor „01.mat“, rovnice (14))

Jen pro úplnost jsme přidali i průběhy získané rovnicemi (15) ze souboru „01.mat“ - ty jsou vidět na obr. 2.12. Je vidět, že model, který byl získán zjednodušením rovnic (14), není dostatečně přesný a jeho použití není oprávněné.

Následující tabulka ukazuje, jaké byly průtoky primárního média při různých odběrech TUV, dále ukazuje odběr primárního média, jak byl vypočítán programem CAS 200.

$q_{TUV}\,[l\,s^{-1}]$	$q_1\,[l\,s^{-1}]$	T_{1I} [°C]	T_{2O} [°C]	T_{1O} [°C]	T_{2I} [°C]	$q_{CAS}\,[l\,s^{-1}]$	Δ[%]
0	0,0473	100	55	52,5	50,0	0,0472	0,21
0,05	0,0660	100	55	52,6	48,7	0,0663	-0,45
0,1	0,0970	100	55	52,9	46,6	0,0976	-0,62
0,15	0,1265	100	55	53,1	45,2	0,1267	-0,16
0,2	0,1560	100	55	53,3	43,5	0,1567	-0,45
0,25	0,1870	100	55	35,4	42,5	0,1873	-0,16
0,3	0,2180	100	55	53,6	41,5	0,2176	0,18
0,35	0,2485	100	55	53,8	40,6	0,2484	0,04
0,4	0,2800	100	55	53,9	39,8	0,2795	0,18
0,45	0,3110	100	55	54,0	39,1	0,3103	0,23
0,5	0,3420	100	55	54,1	38,4	0,3419	0,03
0,55	0,3740	100	55	54,3	37,9	0,3728	0,32
0,6	0,4030	100	55	54,4	37,4	0,4045	-0,37
0,65	0,4370	100	55	54,4	36,9	0,4355	0,34
0,7	0,4660	100	55	54,5	36,5	0,4664	-0,09
0,75	0,4980	100	55	54,6	36,1	0,4957	0,46
0,8	0,5300	100	55	54,7	35,7	0,5313	-0,25
0,85	0,5600	100	55	54,8	35,4	0,5614	-0,25
0,9	0,5940	100	55	54,8	35,1	0,5932	0,13

Tab. 2.2– Ověření přesnosti modelu soustavy

q_{TUV} - odběr TUV

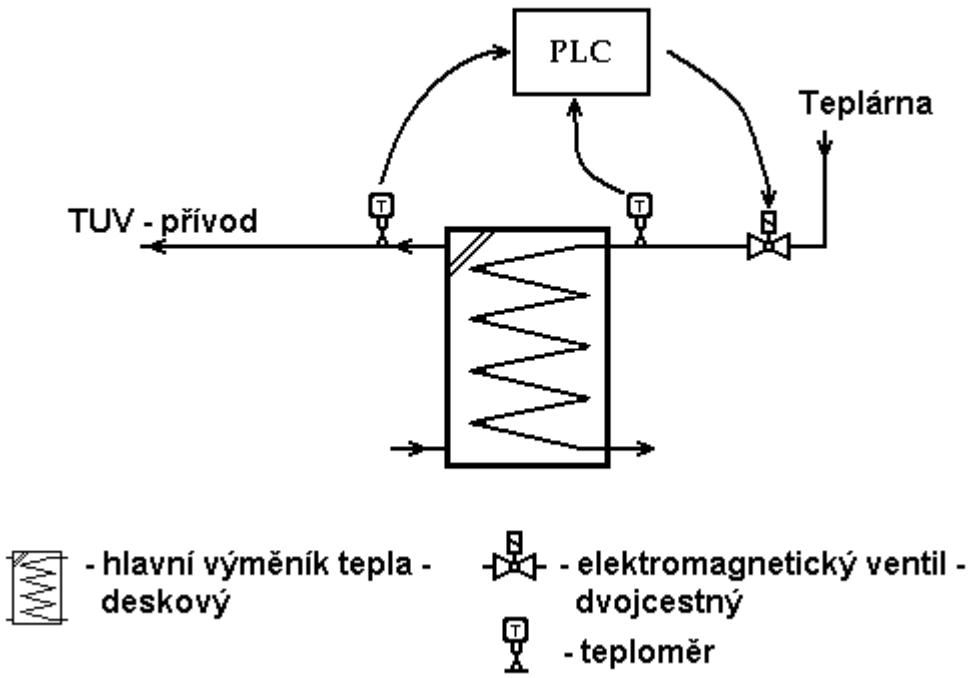
q_{CAS} - odběr vody spočítaný v CAS 200 pro daný odběr TUV a pro teploty zjištěné na výměníku

Data jsme získali tak, že jsme simulovali rostoucí odběr TUV (první sloupec). Model stanice včetně regulátoru zajistil, aby byl potřebný výkon pokryt přítokem primárního média (druhý sloupec). Ve třetím sloupci je vstupní teplota primárního média, ve čtvrtém požadovaná teplota TUV (její dosažení zajišťuje regulátor), v pátém je výstupní teplota primárního média, v šestém je vstupní teplota sekundárního média. V sedmém sloupci je průtok primárního média, který byl spočítán v program CAS 200 pomocí hodnot z prvního, třetího, čtvrtého, pátého a šestého sloupce. V osmém sloupci je spočítána odchylka průtoku zjištěného naším modelem a programem CAS 200. Odchylka je udávána v procentech.

Kapitola 3

3 Regulace výměníkové stanice TUV

Před prvním nastavením regulátoru je důležité si zjistit, jaký systém se budeme snažit řídit. V našem případě se jedná o systém s měnícími se parametry. Při nulovém odběru TUV má stanice výkon 10 kW a při maximálním odběru TUV dle normy [2], to je $0{,}8\,l\,s^{-1}$ (s rezervou, se kterou byla stanice dimenzována, jsme schopni dodávat $0{,}9\,l\,s^{-1}$), má celkový výkon 150 kW. Tento výkon je rozdělen následovně: hlavní výměník má výkon 83 kW a dochlazovací výměník má výkon 67 kW.



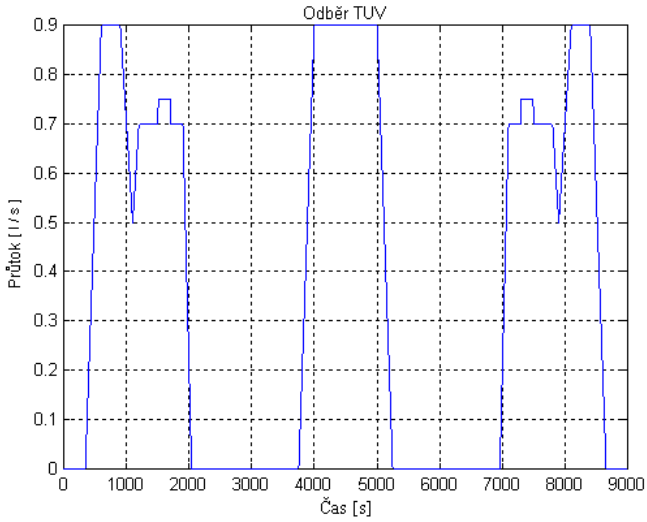
Obr. 3.1–Regulace TUV

Protože nám program CAS 200 od firmy Alfa Laval umožnil provést návrh výměníků a kontrolu shody dosažených výsledků s možnými průběhy teplot na výměníku, předpokládáme, že budou použity výměníky od této firmy. Náš

hlavní výměník má plochu $1m^2$, dochlazovací výměník má plochu $0{,}8m^2$. Způsob sestavení výměníku je shodný se sestavením na obr. 2.6.

Z důvodu co nejmenší výpočetní náročnosti algoritmu jsme použili klasický PID regulátor, který je již v PLC[1] od firmy Teco implementován. V našem případě jsme měli návrh ulehčen, protože samotný ventil s pohonem je ovládán stejně, jako je popsáno u jeho modelu v kap. 2.2, a tím se chová jako integrační člen. Pro řízení naší soustavy tedy postačí PD regulátor.

Při návrhu regulátoru se také musí kromě požadavků na přesnost a rychlost regulátoru brát ohled i na vlastnosti ventilu. Je sice možné najít takové nastavení, které splní požadavky na přesnost i rychlost, to ale současně povede k přetěžování pohonu ventilu a tím i jeho předčasnému zničení. Z tohoto důvodu by regulace měla být co nejklidnější a bez zákmitů. Při ceně ventilu se jeho předčasná výměna citelně projeví ve finanční náročnosti provozu (ať už tuto cenu zaplatí provozovatel, nebo dodavatelská firma).



Obr. 3.2–Simulovaný odběr TUV

Všechny následující průběhy (pokud nebude uvedeno jinak) byly získány při odběru TUV simulovaném dle obr. 3.2 Dále předpokládáme teplotu vody přiváděné z teplárny 100°C a použití ventilu MXG461B20-5, který má maximální průtok $1{,}38ls^{-1}$. Tento maximální průtok by měl být schopen energeticky pokrýt dodávku TUV i v letním období, při kterém dochází k poklesu teploty dodávané vody z teplárny na 80°C. Kromě tohoto poklesu musíme počítat i s možným poklesem teploty kvůli malé havárii

[1] Programmable Logic Controller

v teplárně. Náš návrh by měl zabezpečit dodávku TUV při poklesu teploty dodávané vody z teplárny na 70°C. Nemůžeme při tom volit ventil s větším průtokem, protože i když je výměníková soustava navržena s 15% výkonovou rezervou, tak by při zvyšování možného průtoku ventilem při současném zvýšení teploty dodávané vody z teplárny (v zimním období výjimečně v některých městech až 130°C) a při omezené citlivosti ventilu mohlo dojít ke kmitavé regulaci teploty z důvodu malého rozlišení zdvihu ventilu.

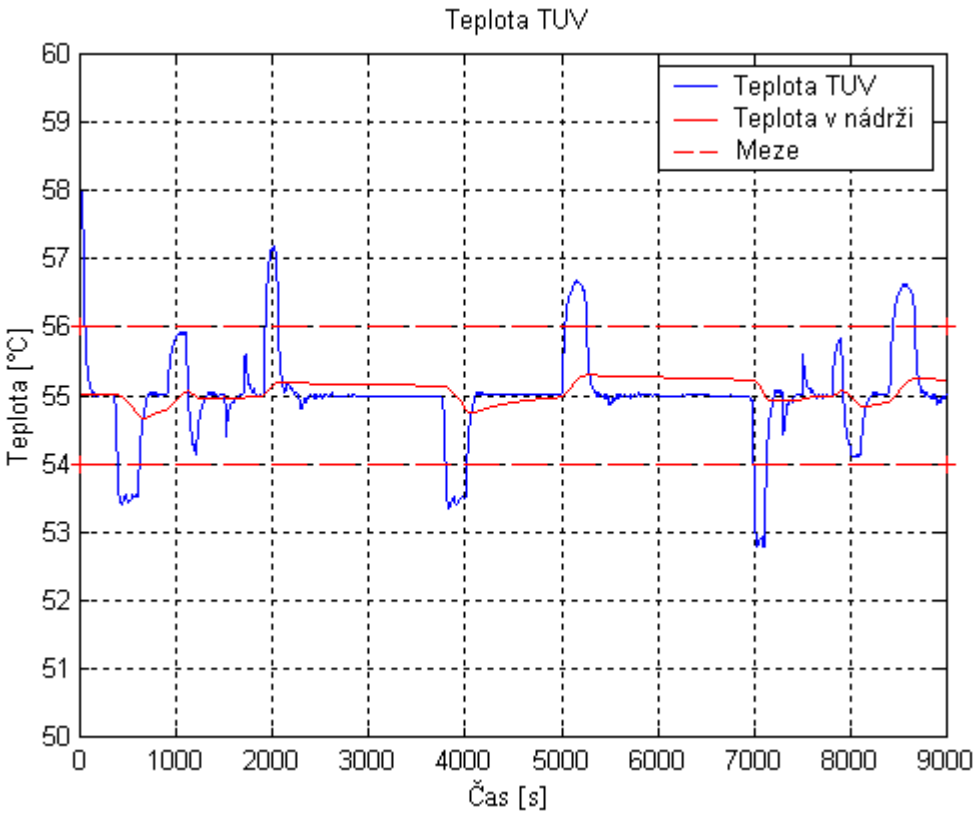
Požadavky na přesnost regulace dodává provozovatel výměníkové stanice. V případě, že je neurčí přesněji, řídíme se normou [2]. Ta povoluje krátkodobý pokles v době špičkového odběru až na 45°C. Jinak by se měla teplota u odběratele pohybovat v rozmezí 50 až 55°C. A kromě nutných případů (např. dezinfekce ohřevem u akumulačního způsobu ohřevu) by teplota v žádném místě včetně výměníku neměla překročit 60°C (z důvodu koroze). Vzhledem k uvedeným důvodům jsme zvolili teplotu TUV na výstupu z výměníkové stanice rovnou 55°C.

3.1 Regulace pomocí klasického PD regulátoru

Pro regulaci použijeme PD regulátor, jak bylo uvedeno dříve. Nemůžeme použít samotný P regulátor, protože ten reaguje pomalu na změnu teploty a bez použití akumulační nádrže způsobuje kmitavý běh celé soustavy. Nastavování regulátoru by mělo probíhat, když stanice pracuje v režimu zimního období. V tuto dobu je největší možná dodávka energie na jednotkový průtok primárního média do soustavy a v případě správného nastavení regulátoru, nemůže dojít při poklesu teploty vody dodávané z teplárny k intenzivněji kmitavému běhu. V případě, že jsme nuceni nastavovat regulátor v letním období, musíme očekávat pokles teploty vody dodávané z teplárny, a proto nastavit méně přesnou regulaci, než by bylo možné. Pro to, aby regulátor mohl být použit na co nejjednodušším hardwaru (kompaktním PLC), není možno

použít například prediktivní regulátor, ani žádný jiný složitější regulátor, který by tuto vlastnost odstranil. Museli jsme proto nalézt způsob, jak řídit výměníkovou stanici PD regulátorem s vhodně se měnícími parametry, a to celkovým zesílením akčního zásahu vypočítaného regulátorem, který má vliv na jeho konstanty.

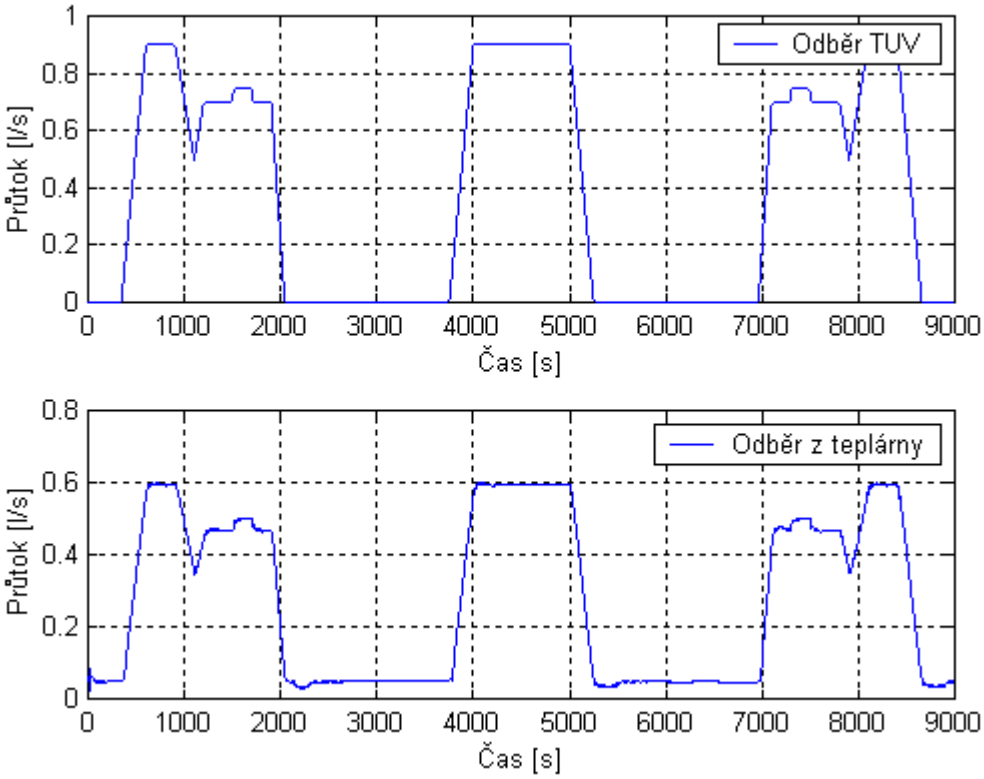
Po několika pokusech o nastavení regulátoru na modelu stanice byl vybrán PD regulátor se zpožděním s přenosem $R(s) = \frac{5{,}5s + 0{,}624}{s + 2}$. S tímto regulátorem byly získány v programu Matlab následující průběhy teplot a průtoků.



Obr. 3.3–Teplota TUV

Modrý průběh na obr. 3.3 je teplota vody vystupující přímo z výměníku, červený průběh je teplota vody vystupující z třistalitrové vyrovnávací nádrže, v případě, že bude zařazena. Červeně čárkované meze ohraničují rozsah teplot 54°C až 56°C, který je často požadovaný provozovatelem stanice. Je vidět, že při této regulaci průtočného ohřevu nelze této přesnosti dosáhnout. Požadavky

provozovatele jsou přísnější než požadavky dané normou [2]. Na obr. 3.4 je vidět průběh odběru TUV a spotřebu vody přiváděnou z teplárny.



Obr. 3.4- Odběry vody

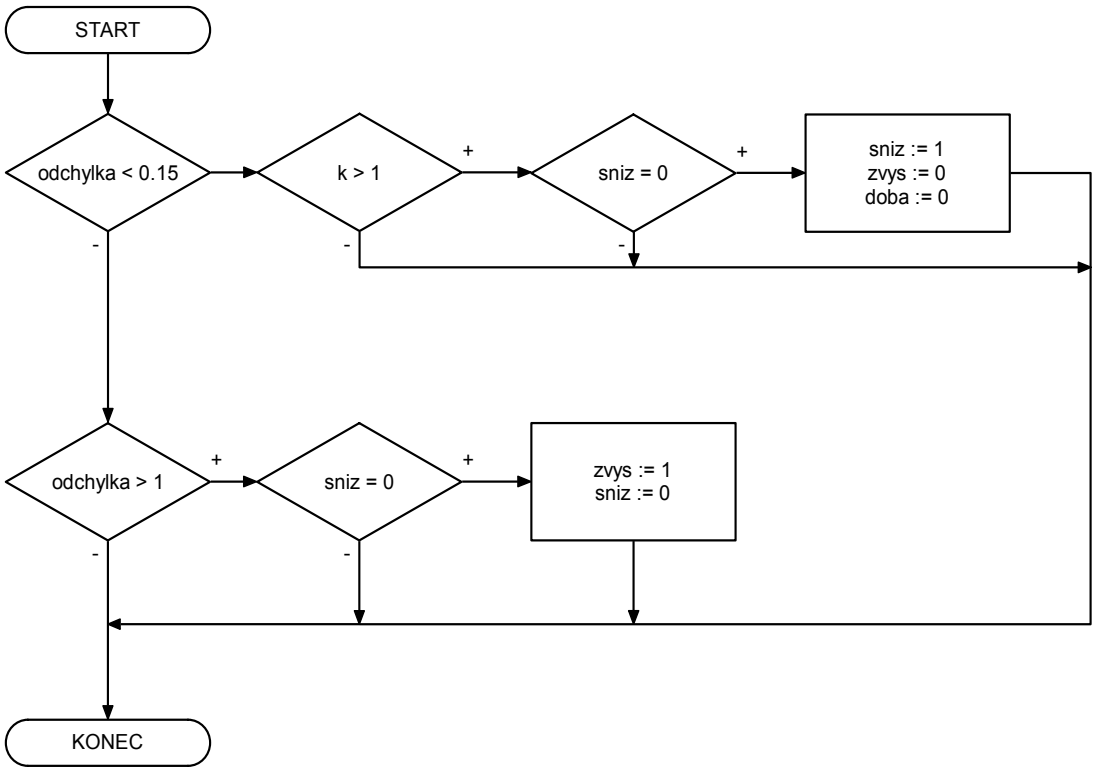
Přesnost regulace lze posoudit i podle různých odběrů vody z teplárny. Na nich je pozorovatelné, že přibližně dodržují tvar odběrů TUV, ale při změnách nedokážou tento tvar dostatečně rychle sledovat, což zapříčiňuje odchylky teplot pozorovatelné na obr. 3.3.

3.2 Regulace pomocí PD regulátoru s proměnnými parametry

Abychom dosáhli požadované přesnosti regulace, můžeme použít regulátor s proměnnými parametry. Ze dvou možností: měnit parametry regulátoru přímo, nebo pouze zesilovat akční zásah vypočítaný regulátorem jsme vybrali druhou možnost, protože při praktickém použití regulátoru se nastaví pouze jedny koeficienty a následně se určí, jaké bude maximální

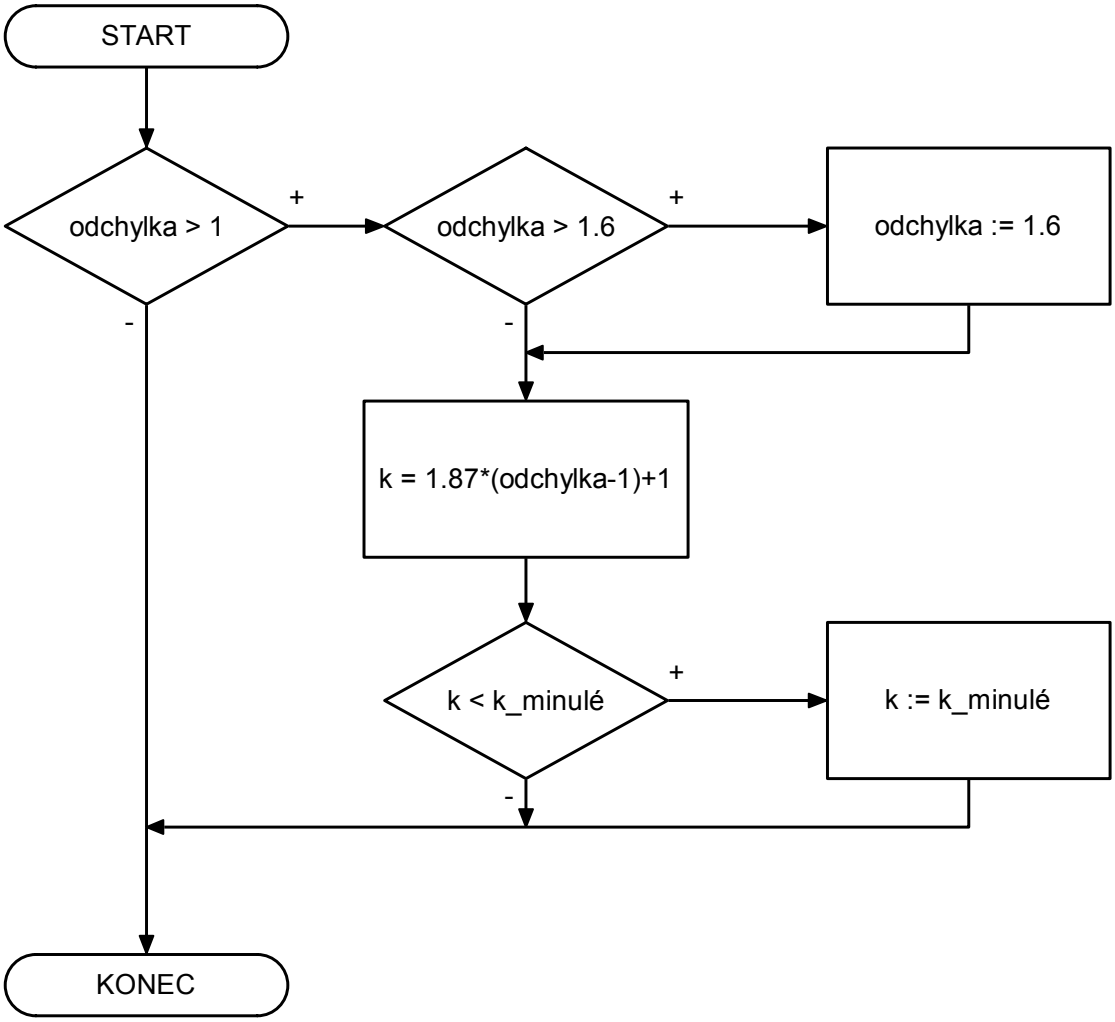
zvětšení akčního zásahu, kdy se zesílení začne uplatňovat a s jakou strmostí bude zesílení od minimální do maximální hodnoty stoupat. V prvním případě bychom toto museli hledat pro oba parametry regulátoru.

Nejprve jsme zkoušeli vyhodnocovat velikost akčního zásahu regulátoru a podle toho měnit zesílení. Později jsme zjistili, že tento způsob je použitelný pouze při přesném měření teploty, jakmile jsme však zavedli omezení přesnosti měření teploty (0,05°C), tento způsob začal být nepřesný.



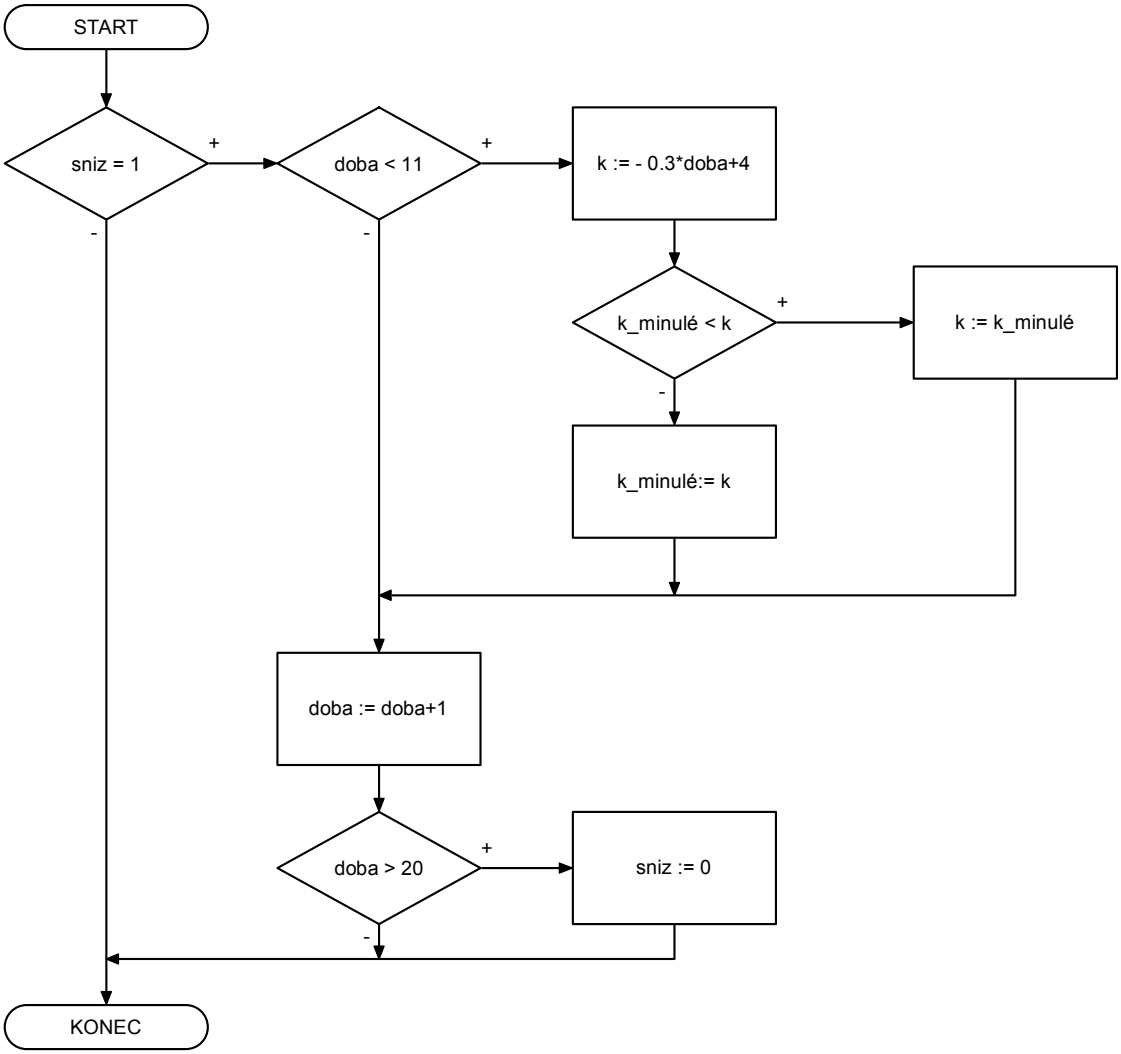
Obr. 3.5–Rozhodování o změně zesílení

Začali jsme proto vyhodnocovat odchylku teploty TUV od požadované hodnoty a podle ní rozhodovat, jestli se zesílení akčního zásahu bude měnit a jak. Ve vývojovém diagramu na obr. 3.5 je vidět, jak při tomto vyhodnocování postupujeme. Odchylku zjišťujeme následovně: $odchylka = abs(T_{TUV} - T_{ŽÁDANÁ})$, zesílení akčního zásahu je k, $sniz$ a $zvys$ jsou proměnné, které spouštějí procedury snižování a zvyšování zesílení. Proměnná $doba$ slouží při snižování zesílení akčního zásahu. Její použití bude vidět na jednom z následujících vývojových diagramů.



Obr. 3.6–Zvýšení zesílení

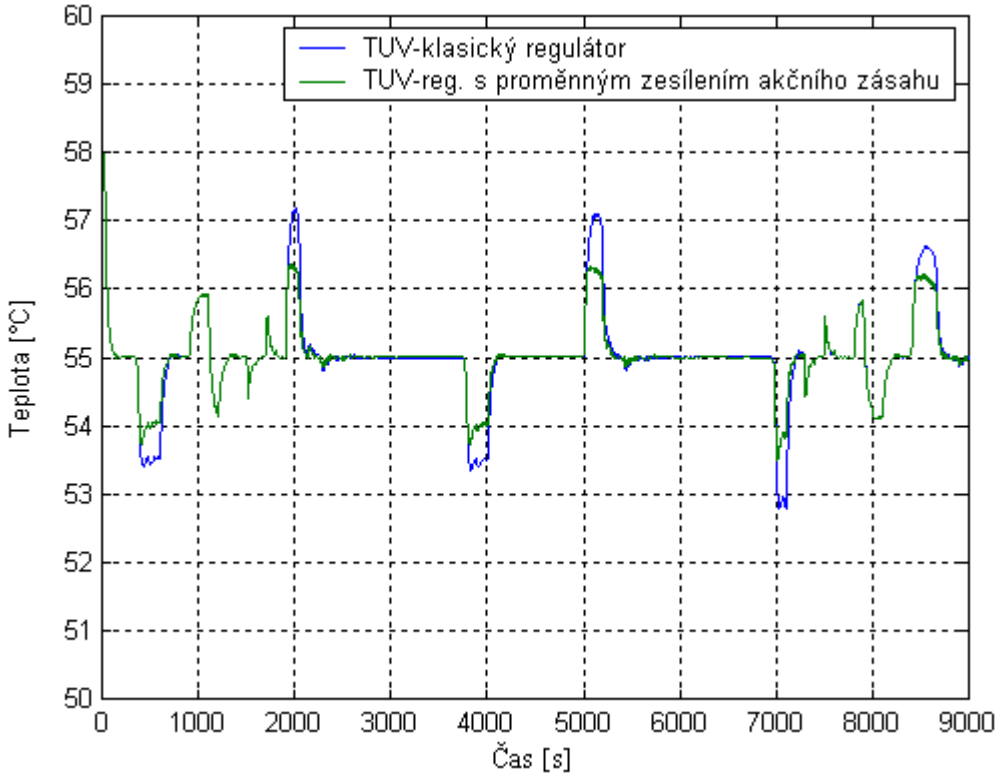
Vývojový diagram obr. 3.6 ukazuje, jak dochází ke zvětšování akčního zásahu. Je vidět, že maximální zvětšení akčního zásahu je 2,12 a je závislé pouze na dosažené odchylce teploty TUV od požadované hodnoty. Toto zesílení zůstává stále stejně velké, dokud nedojde ke snížení odchylky pod zvolenou mez. Všechny hranice, kdy dochází k nějakým změnám, byly stanoveny empiricky na základě pozorování chování použitého modelu stanice.



Obr. 3.7-Snížení zesílení

Na vývojovém diagramu na obr. 3.7 je vidět postup, při kterém dochází ke snižování zesílení, proměnná *doba* určuje čas v sekundách od začátku snižování zesílení. Bylo změřeno, že po snížení zesílení na jedničku dojde k zatlumení případných zákmitů během deseti sekund. Po uplynutí této doby opět může dojít ke zvětšení zesílení v závislosti na odchylce od žádané teploty. Tím, že k němu může dojít až při odchylce teploty větší než jedna, je zajištěno, že nedojde ke zvětšení zesílení při zákmitech teploty TUV způsobených změnou teploty cirkulační vody a tím i k postupnému vzniku kmitavého běhu regulace.

Při aplikaci proměnného zesílení akčního zásahu jsme dosáhli následujícího výsledku



Obr. 3.8–Srovnání regulátorů (zimní provoz)

Je uveden jen průběh teplot, průběh průtoků přibližně odpovídá průběhům na obr. 3.4, pouze přesněji kopíruje odběr TUV (ostřejší přechody). Odběr TUV, pro který jsme získali průběh teplot na obr. 3.8, je vidět na obr. 3.2.

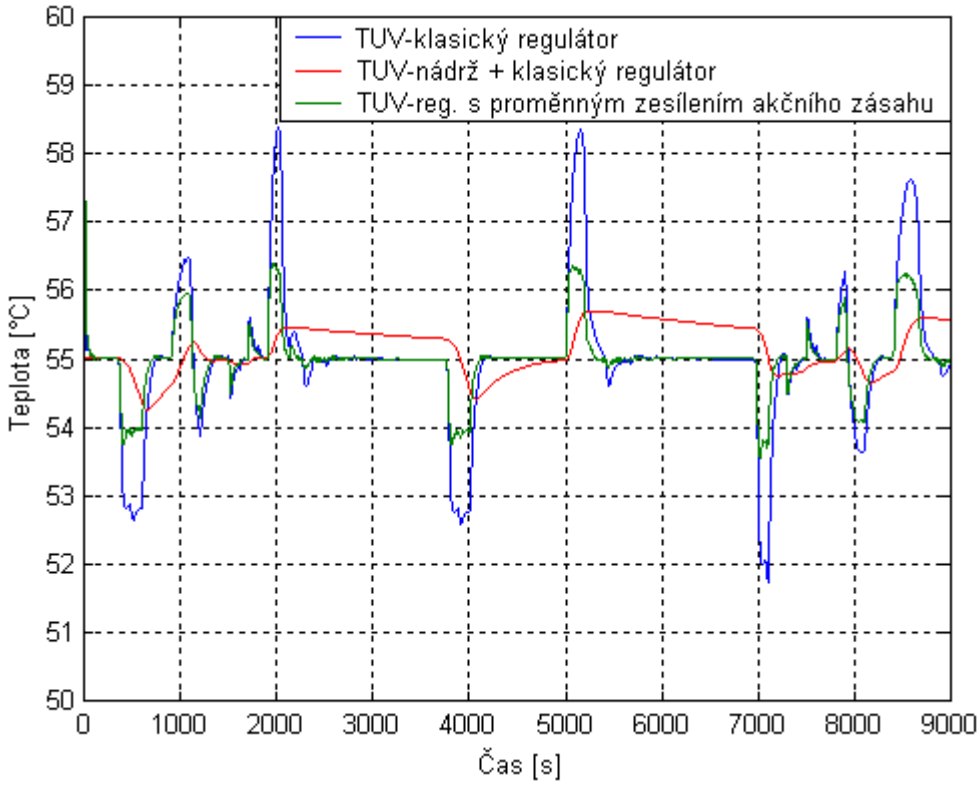
Na obr. 3.8 je vidět, že došlo ke zmenšení rozkmitu, takže způsob řízení soustavy s proměnným zesílením akčního zásahu je úspěšný a lze ho použít. Ani zavedení proměnného zesílení není dostačující, protože regulátor se nedokáže adaptovat na změnu teploty vody přiváděné z teplárny v různých ročních obdobích (různá velikost energie dodaná do soustavy při jednotkovém průtoku). Tím dochází ke zvětšení odchylek teploty od požadované hodnoty s klesající teplotou vody dodávané z teplárny. Proto byl do regulačního obvodu přidán teploměr, který měří teplotu vody přiváděné z teplárny (obr. 3.1). Tato měřená teplota se na výsledném regulačním zásahu opět projeví jako změna zesílení.

V naší soustavě byl klasický regulátor nastaven v zimním provozu (voda přiváděná z teplárny měla teplotu 100°C). Zesílení akčního zásahu odpovídající jiné teplotě přiváděné vody je vypočítáno dle následujícího vztahu

$$k_{OBDOBÍ} = 0{,}025(100 - T_{TEPLÁRNA}) + 1$$

$k_{OBDOBÍ}$ - zesílení akčního zásahu, které se mění v závislosti na teplotě vody z teplárny

$T_{TEPLÁRNA}$ - teplota vody přiváděné z teplárny [°C]



Obr. 3.9–Srovnání regulátorů (letní provoz)

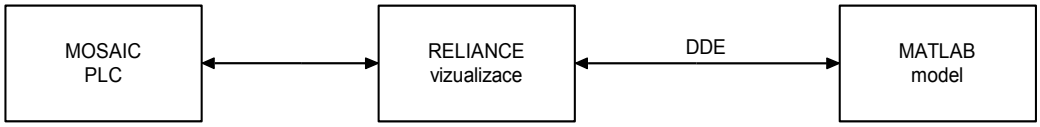
Na obr. 3.9 je vidět, že při použití regulátoru reagujícího i na změnu teploty vody přicházející z teplárny, získáváme lepší regulaci teploty, která není závislá na změně režimu provozu teplárny. Při porovnání průběhů na obr. 3.9 a 3.8 (zelené průběhy) je vidět, že jsem dosáhli stejně kvalitní regulace bez ohledu na teplotu vody přiváděné z teplárny.

Kapitola 4

4 Implementace v PLC

Jak již bylo dříve uvedeno, algoritmus regulátoru by měl být použitelný na co nejjednodušším hardwaru, v naším případě je jím PLC od firmy Teco.

Vzhledem ke špatné spolupráci s firmou Sting Energo, která měla poskytnout potřebná data a umožnit vyzkoušet navržený algoritmus na jedné ze stanic, o něž se starají, nedošlo k vyzkoušení algoritmu na skutečné výměníkové stanici. Abychom měli alespoň nějaké srovnání s výsledky dosaženými v Matlabu a PLC, naprogramovali jsme algoritmus regulace v PLC a toto PLC spojili s programem Matlab, v kterém běžel model výměníkové stanice.



Obr. 4.1-Komunikace mezi programy

Nepracovali jsme se skutečným PLC, ale s PLC simulovaným v prostředí Mosaic. Simulované PLC poskytuje všechny možnosti reálného systému. Ale ani oba výše jmenované programy neumožňují vzájemné propojení. Proto byla vytvořena vizualizace výměníku v programu Reliance, který umožňuje připojení k PLC i v simulovaném modu. Tento program byl současně připojen k Matlabu pomocí protokolu DDE[1]. Protokol DDE byl vybrán pro svoji lety prověřenou spolehlivost i přestože bylo možné použít technologii OPC[2], která pomalu nahrazuje DDE (DDE v nových vývojových prostředí přestává být podporován a na jeho úkor se podporuje technologie OPC).

[1] Dynamic Data Exchange
[2] OLE(Object Link Embedded) for Proces Control

4.1 DDE

DDE je komunikační protokol, který umožňuje sdílet data mezi dvěma programy. Jedná se o způsob komunikace klient-sever, při které se vyměňují řetězce znaků. Inicializaci výměny dat mezi programy vždy zajišťuje klient, který může komunikovat s několika servery. Matlab zde vystupuje jako klient.

Nejprve je nutná inicializace výměny dat, kterou zajišťuje příkaz

```
channal=ddeinit('reli_rts','DdeServer');
```

`channal` - je ukazatel na komunikační kanál mezi programy

`reli_rts` - je název serveru aplikace, se kterým se bude komunikovat

`DdeServer` - je název projektu v Relianci, který obsahuje data, která si budou programy vyměňovat

Když jsme takto inicializovali výměnu dat, tak jsme již mohli posílat data mezi aplikacemi.

```
ddepoke(channal,'tn',T_nadrz(i-1));
```

Příkazem `ddepoke` se posílají data na server.

`tn` - je název proměnné v Relianci, do které zapisujeme proměnnou z Matlabu

`T_nadrz(i-1)` - je název proměnné z Matlabu, která je zapisována do Reliance

```
semafor=ddereq(channal,'sem');
```

Příkazem `ddereq` se čtou data za serveru.

`semafor` - je název proměnné v Maltabu, do které zapisujeme

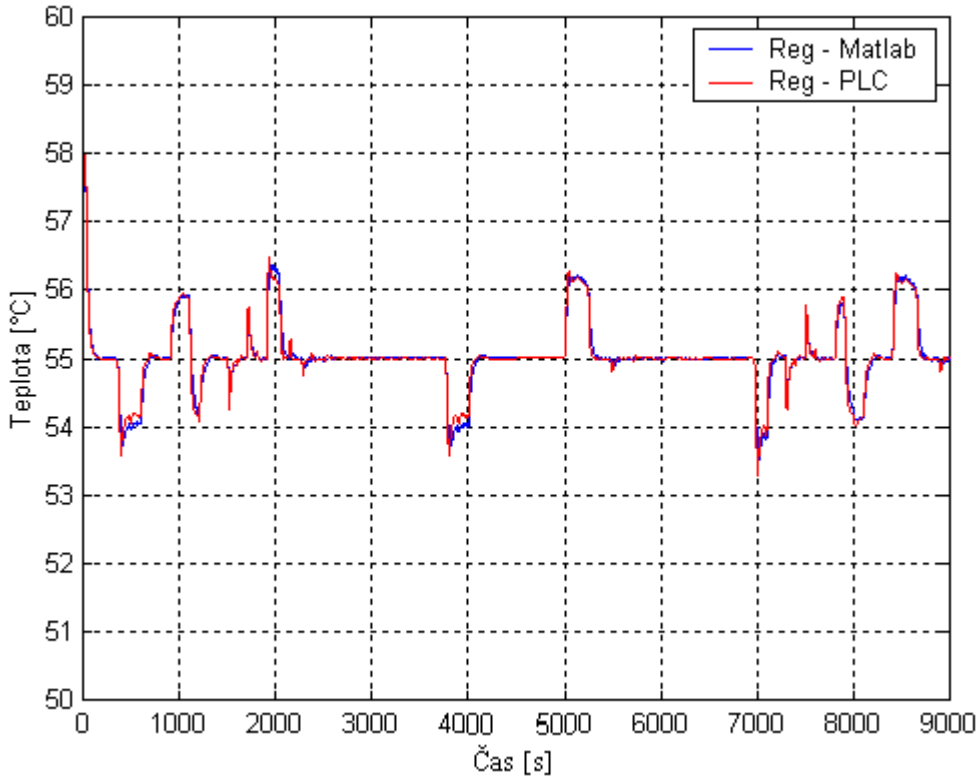
`sem` - je název proměnné v Relianci, ze které čteme

Po výměně všech dat se zruší komunikační kanál pomocí příkazu.

```
ddeterm(channal);
```

Při výměně dat mezi Matlabem a Reliancí (Mosaicem) je třeba zajistit synchronizaci dat, jinak se může stát, že jeden z programů bude reagovat na neaktuální data. Proto byla mezi proměnné, které si programy mezi sebou vyměňují, na každé straně přidána proměnná, která se chová jako semafor. Ta signalizuje programu, že data jsou aktuální a že program může začít počítat novou hodnotu. Po výpočtu nových hodnot jsou tyto předány druhému programu a změněn semafor.

Na následujícím obrázku je vidět výsledek dosažený pomocí regulátoru běžícího v PLC.



Obr. 4.2–Srovnání regulátoru implementovaného v Matlabu a PLC

Na obr. 4.2 je vidět srovnání průběhu výstupní teploty TUV řízené pomocí PLC (červený průběh) a Matlabem (modrý průběh).

Regulátor v PLC běží v nestandardním modu, instrukce `PID` není zařazována v každém cyklu PLC, ale pouze po každé výměně dat s Matlabem (přibližně každou sekundu). Ani konstanty regulátoru proto nejsou nastaveny

stejně jako v Matlabu, proporcionální složka je stejná, ale derivační časová konstanta je nastavena na 0,1 sekund. Toto nastavení regulátoru při daném omezení četnosti výpočtu akčního zásahu nám umožnilo získat srovnatelný průběh regulace s Matlabem. Z obr. 4.2 lze předpokládat, že použití dříve popisovaného regulátoru v PLC bude při řízení výměníkové soustavy úspěšné a skutečně povede ke snížení rozkmitu teploty TUV.

Kapitola 5

5 Použití regulace s proměnným zesílením akčního zásahu

Snahou investorů je snížit náklady na stavbu stanice, zakázku na její postavení dostane tedy pravděpodobně firma s nejnižší cenovou nabídkou. Proto je snaha odstranit všechny „přebytečné“ části stanice např. akumulační nádrž.

I při požadavcích na co nejnižší cenu investor samozřejmě požaduje co nejpřesnější regulaci teploty TUV. Požadavek na dosaženou přesnost $\pm 1\,°C$ za všech provozních podmínek výměníkové stanice dnes rozhodně není výjimečný. Tento požadavek vede k použití ventilů s vysokou rychlostí přeběhu (cca. sekundy). Tyto ventily se již začínají prosazovat i při akumulačním způsobu ohřevu. Postupně se tak vytrácí jedna z výhod (pomalejší ventil) tohoto způsobu přípravy TUV.

Na průbězích teplot umístěných v příloze je vidět, že možné požadované přesnosti $\pm 1\,°C$ se při průtočném způsobu ohřevu nepodařilo dosáhnout. Na druhou stranu požadavek na přesnost regulace můžeme vyvážit nižší cenou tohoto řešení a menším požadavkem na plochu zastavěnou stanicí.

Pokud předpokládáme použití akumulačního ohřevu s použitím rychlého ventilu a regulaci teploty TUV škrcením průtoku primárního média, bude ušetřená částka při průtočném způsobu přípravy TUV představovat plnou cenu nádrže a to i přes to, že jsme při regulaci museli použít teploměr, který se při akumulačním způsobu ohřevu nepoužívá. Tento teploměr se sice při akumulačním způsobu ohřevu nepoužívá pro regulaci, ale ve stanici je instalován z důvodu měření energie, která byla dodána do soustavy a kterou

uživatelé musí zaplatit. Když tento teploměr použijeme pro regulaci, zvýší nám to náklady pouze o cenu vodiče připojeného k teploměru a zároveň ušetříme za prostor, kde měla být nainstalována nádrž.

Pokud bychom srovnávali použití akumulačního způsobu ohřevu s použitím pomalejšího ventilu a průtočného způsobu ohřevu s rychlým ventilem, není už cenová úspora tak znatelná. Cena nádrže je 19 000 Kč. Celková cena ventilu VVF40.25-5 s pohonem SQX62 je 20 872 Kč [13]. S touto konfigurací ale nejsme při letním provozu schopni dosáhnout přesnosti $\pm 1\,°C$. I tak je cena tohoto řešení 39 872 Kč oproti ceně magnetického ventilu s pohonem MGX461B20-5, která činí 36 059Kč. Při podobných vlastnostech lze při použití průtočného ohřevu ušetřit 3 813 Kč. Pokud bychom chtěli dosáhnout při použití akumulačního ohřevu s pomalejším ventilem přesnosti $\pm 1\,°C$, museli bychom použít větší akumulační nádrž, jejíž cena je samozřejmě větší.

Z výše uvedené kalkulace, která je pouze přibližná (prodejce poskytuje slevy dle zkušenosti se zákazníkem), je vidět, že pokud chceme dosáhnout velké přesnosti teploty TUV a její pomalé změny, musíme vždy použít akumulační nádrž. Investiční náklady budou vždy vyšší než při použití průtočného způsobu přípravy TUV.

Kromě nižších nákladů na stavbu stanice s průtočným ohřevem je vhodné tento způsob použít v případě omezeného instalačního prostoru.

Kapitola 6

6 Závěr

Účelem této diplomové práce bylo nalezení způsobu možného řízení nízkokapacitní výměníkové stanice TUV. Abychom mohli experimentovat s různými druhy regulátorů, museli jsme nejprve vytvořit model výměníkové soustavy. Tento model se skládá z několika dílčích modelů, např. výměníku, ventilu a nádrže. Při vytváření modelu výměníku jsme se museli samozřejmě kromě studia dostupné literatury seznámit i s programem pro výpočet a dimenzováni tepelných deskových výměníků a též s normou zabývající se návrhem TUV. K ověření modelu s daty naměřenými na výměníkové stanici nemohlo dojít. Ověření modelu výměníku tedy proběhlo srovnáním s daty naměřenými na tepelné soustavě Centra aplikované kybernetiky a výsledný model soustavy byl porovnán s daty získanými pomocí programu pro návrh výměníků.

Při návrhu regulátoru bylo zjištěno, že klasický PD regulátor není dostačující pro řízení výměníkové stanice při průtočném způsobu přípravy TUV. Na druhou stranu se ale při řízení výměníkových stanic nepoužívá dostatečně výkonný hardware, který by umožnil sofistikovanější způsob regulace. Toto je základní omezení, kterým jsme byli limitováni při návrhu jiného způsobu regulace. K tomuto omezení ještě přistupuje požadavek, aby se cena nového způsobu řízení příliš nelišila od klasické regulace.

Při těchto omezeních jsme zvolili regulaci PD regulátorem s proměnným zesílením akčního zásahu. Toto řešení nepřináší nové náklady a dosáhli jsme s ním lepší výsledky než při klasické regulaci. Často požadované přesnosti $\pm 1\,°C$ se nepodařilo dosáhnout. Je pravděpodobné, že bez zvýšení ceny regulátoru a nově umístěných měřicích členů ani nelze při průtočném ohřevu

této přesnosti dosáhnout. Na druhou stranu se nám ale povedlo dosáhnout stabilní maximální odchylky průběhu výstupních teplot TUV při různých teplotách vody přiváděné z teplárny (toto je vidět v přiložených grafech umístěných na konci práce).

Nevýhodou bohužel je, že nastavování regulátoru je časově o něco náročnější než při použití klasického regulátoru. Tato náročnost ale klesá s počtem implementovaných regulátorů. Pravidla, kdy dochází ke zvětšení a zmenšení zesílení by měla být obecně přenositelná, takže po určitém počtu implementací už toto nastavení nezabírá čas a nastavuje se pouze PD regulátor.

7 Literatura

[1] Brož K.: *Zásobovaní teplem.* Vydavatelství ČVUT, Praha, 1997

[2] Norma ČSN 06 0320 *Ohřívání užitkové vody – Navrhování a projektování*. Český normalizační institut, Březen 1998

[3] *Tisk – Nádrže.* [online]
[cit. 2004-10-21]
http://www.esl.cz/index1ba32.html?typ=ESC&showid=78

[4] *Metodické doporučení státního zdravotního ústavu- podle §3 odst. 3 zákona č. 258/2000 Sb. v platném znění*. Státní zdravotní ústav, Praha 2004 [online] [cit. 2004-10-25]
www.szu.cz/chzp/voda/pdf/tuv.pdf

[5] *Firemní dokumentace firmy Decon.* [online]
[cit. 2004-10-21]
http://www.decon.cz/stanice/warmline1.htm

[6] *Firemní dokumentace firmy Siemens, divize Landys & Staffea.* [online]
[cit. 2004-10-27]
http://www.sibt.cz/dok/pdf/N4461C.pdf

[7] *Firemní dokumentace firmy Alfa Laval.* [online]
[cit. 2004-10-27]
www.alfalaval.com/digitalassets/2/file13975_0_Alfa_Laval_-_plate_technology.pdf

[8] Noskievič P. : *Modelování a identifikace systémů*, Montanex, Ostrava, 1999

[9] Zítek P., Víteček A. : *Návrh řízení podsystémů se zpožděním a nelinearitami* Vydavatelství ČVUT, Praha, 1999

[10] Černoch S. : *Strojně technická příručka*, SNTL, Praha, 1968

[11] Bašta J. : *Hydraulika a řízení otopných soustav* Vydavatelství ČVUT, Praha, 2003

[12] Hemzal K., Chyský J. : *Přenosové jevy v technice prostředí* Editační středisko ČVUT, Praha, 1987

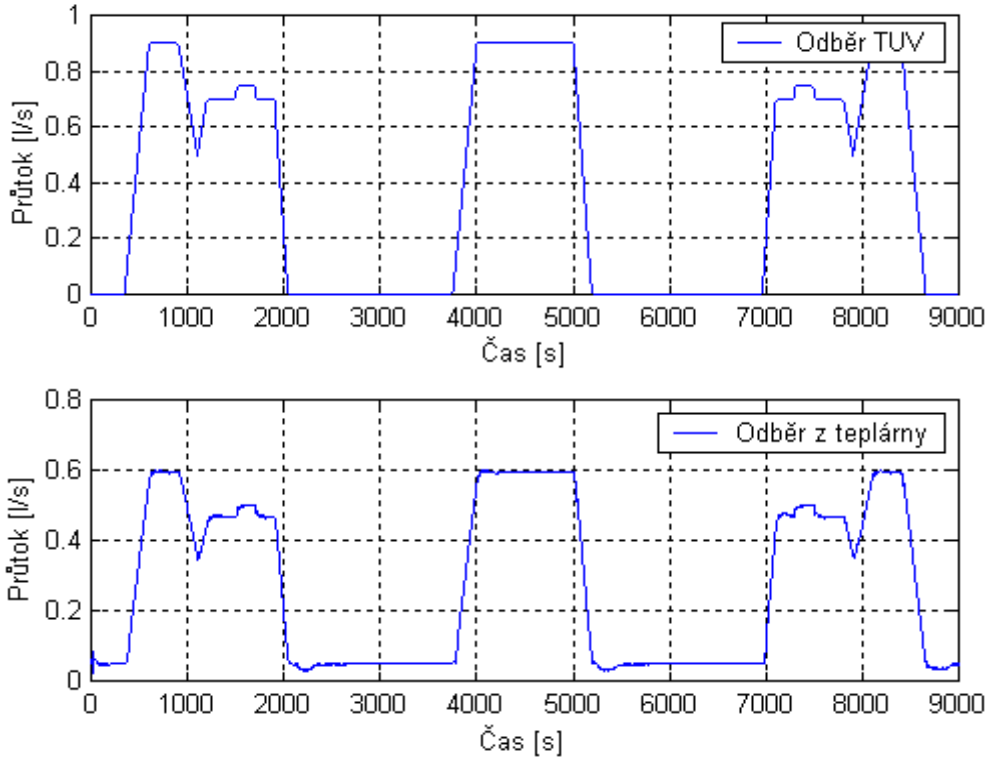
[13] *Ceník Siemens Building Technologies.* [online] [cit. 2004-11-27] http://www.sibt.cz/prd/CenikObrazky2004.pdf

8 Přílohy

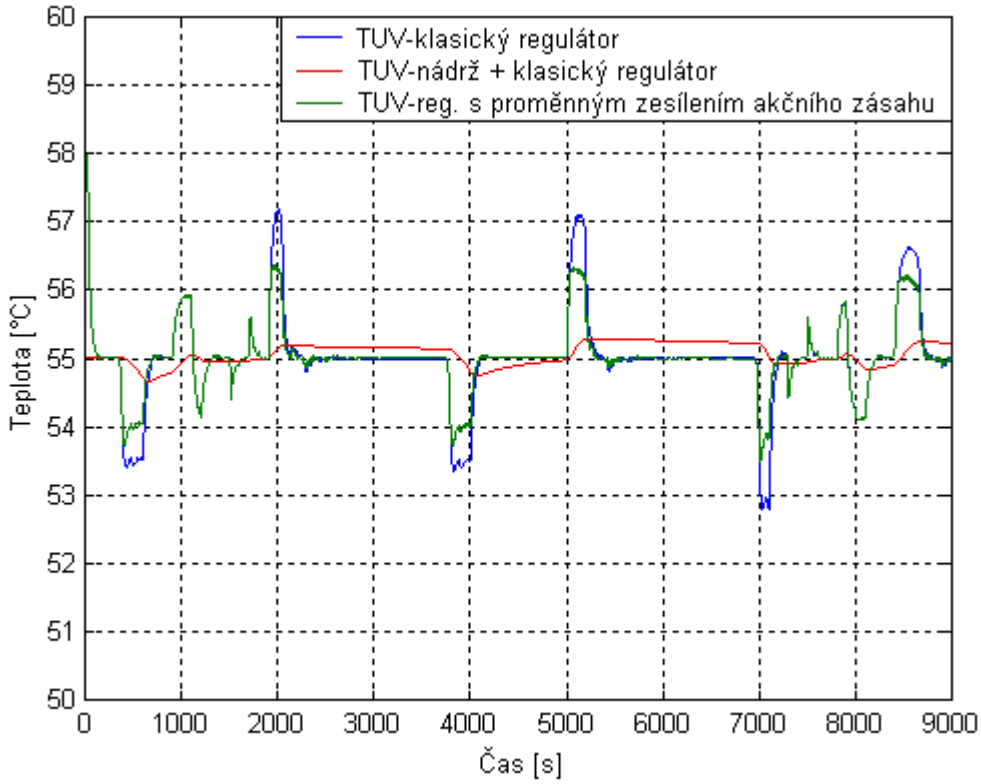
Na následujících stranách budou uvedeny průběhy teplot a průtoků pro různé teploty vody přiváděné z teplárny.

Průběh s červenou barvou náleží akumulačnímu způsobu ohřevu při použití klasického regulátoru. Průběh s modrou barvou připadá na průtočný způsob ohřevu při použití klasického regulátoru. Zelený průběh náleží průtočnému způsobu ohřevu při použití regulátoru s proměnným zesílením akčního zásahu.

8.1 Teplota vody přiváděné z teplárny 100°C

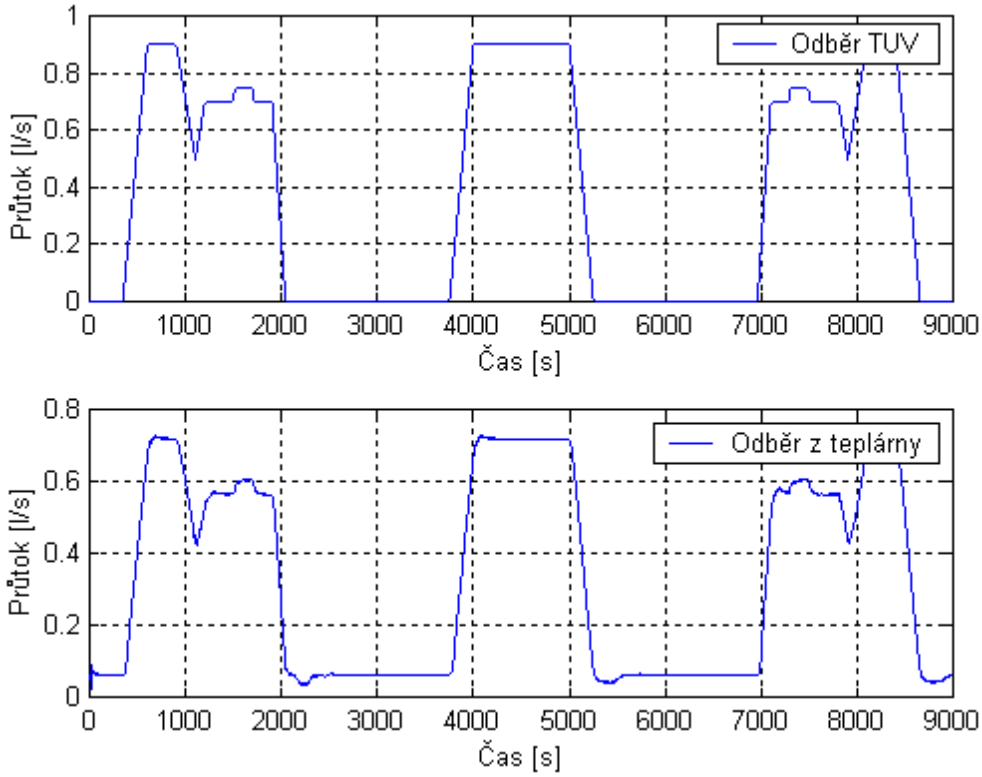


Obr. 8.1-Průtoky (100°C)

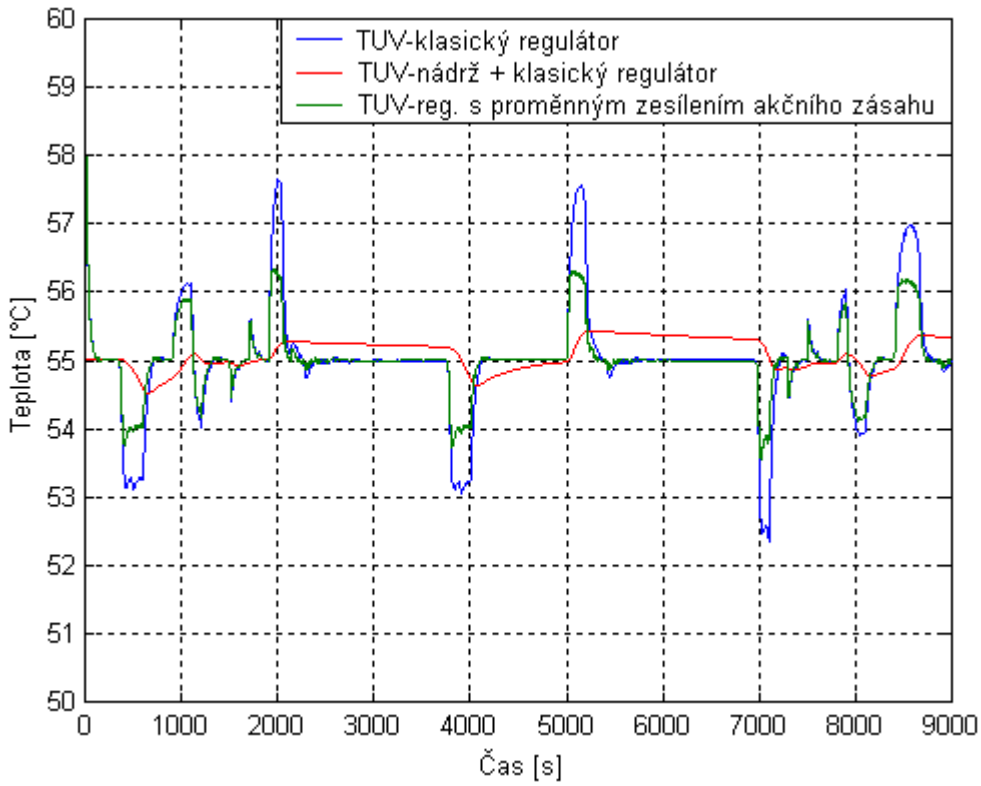


Obr. 8.2-Teploty TUV (100°C)

8.2 Teplota vody přiváděné z teplárny 90°C

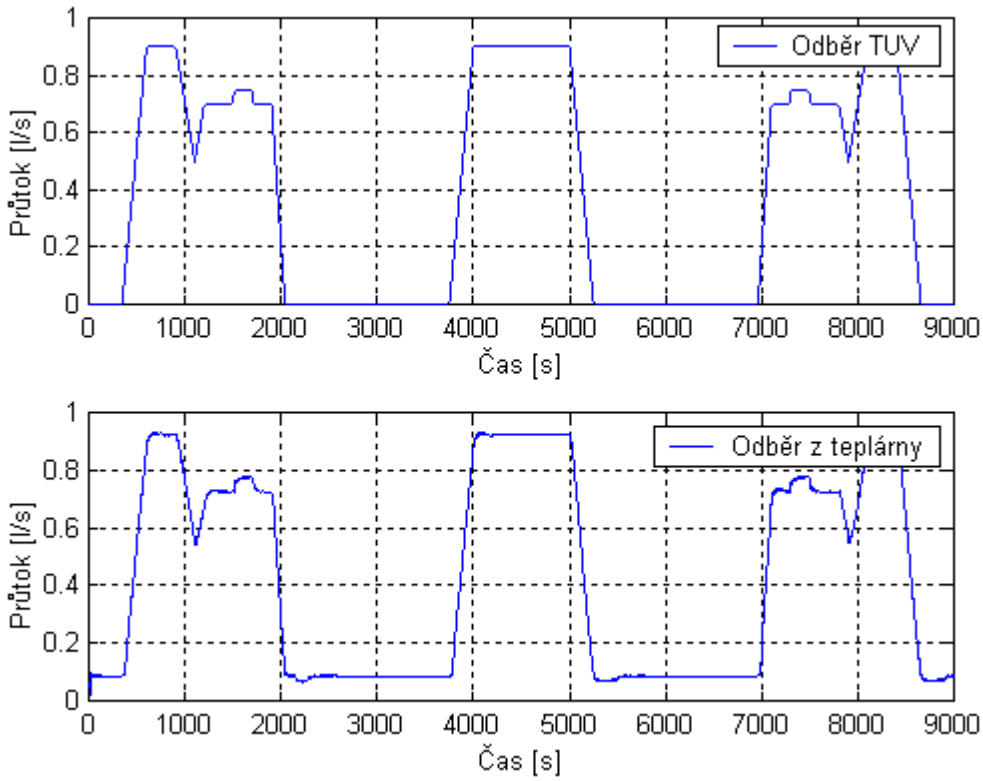


Obr. 8.3-Průtoky (90°C)

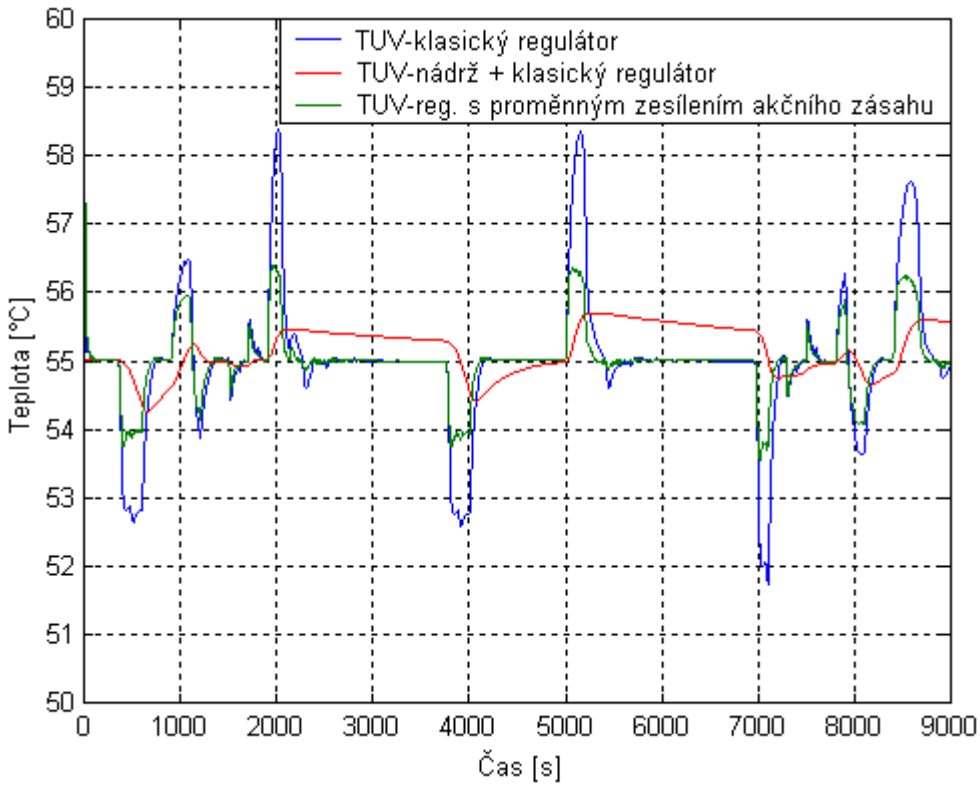


Obr. 8.4-Teploty TUV (90°C)

8.3 Teplota vody přiváděné z teplárny 80°C

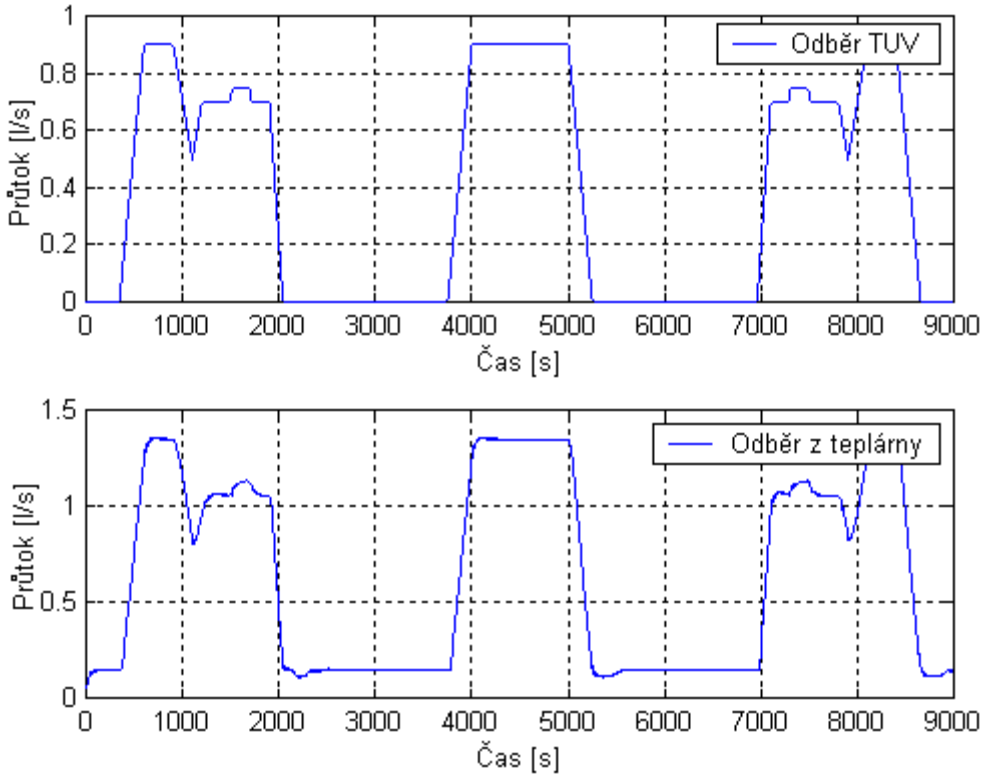


Obr. 8.5-Průtoky (80°C)

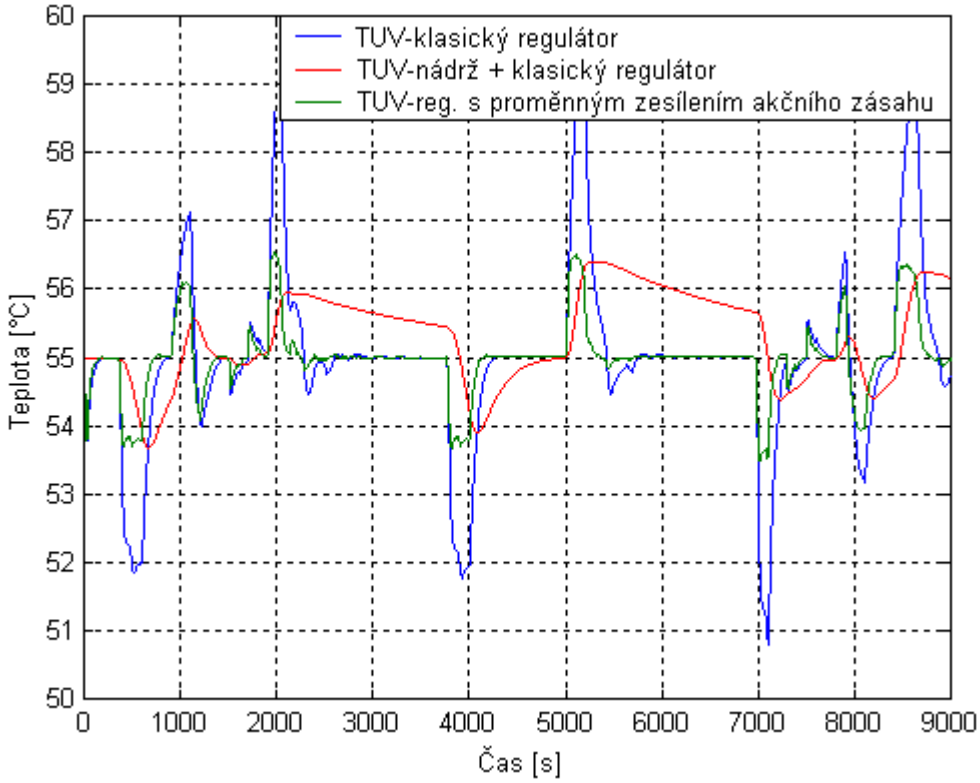


Obr. 8.6-Teploty TUV (80°C)

8.4 Teplota vody přiváděné z teplárny 70°C



Obr. 8.7-Průtoky (70°C)



Obr. 8.8-Teploty TUV (70°C)

8.5 Obsah CD

`\text\dp_2005_fencl_tomas.pdf`

Text diplomové práce

`\text\zadani.pdf`

Zadání diplomové práce

`\matlab\m.zip`

Zabalený program v Matlabu (model výměníkové stanice, akumulační nádrže, ventilu, regulátoru).

`\PLC\m.zip`

Zabalený program v Matlabu, který přes DDE umožňuje spojení s regulátorem napsaným v programu Mosaic.

`\PLC\rel.zip.`

Zabalený projekt vizualizace výměníkové stanice v programu Reliance

`\PLC\plc.zip.`

Zabalený projekt regulátoru napsaný v programu Mosaic

`\PRUBEHY\*.mat`

Průběhy teplot naměřené na tepelné soustavě Centra aplikované kybernetiky.

`\PRUBEHY\*.bmp`

Grafy srovnávající naměřené průběhy teplot, s průběhy získanými modelem výměníku.