ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA ŘÍDICÍ TECHNIKY

TEPLOTNÍ ČIDLA

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Daniel Tokar

Vedoucí práce: **Ing. Jaroslav Honců, CSc.**

Oponent: **Ing. Vít Klein, Ph.D.**

Praha, červen 2009

Originál zadání práce

Tímto bych rád poděkoval zejména Ing. Vítu Kleinovi, Ph.D., za cenné rady, přiblížení dané problematiky a poskytnutou literaturu.

Velký dík patří Ing. Jaroslavu Honců, CSc., za celkovou podporu a vedení mé práce i velice důležité rady a připomínky k jejímu obsahu.

V neposlední řadě bych rád poděkoval p. Hanušovi a p. Grafovi ze společnosti MARTIA a.s., Ústí nad Labem, kteří mi vždy ochotně poskytli odbornou radu a uvedli mě do stávající problematiky.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, software atd.) uvedené v přiloženém seznamu.

V Praze dne 9. 7. 2009 Daniel Tokar

Nezkrácený název práce

Optimalizace volby teplotních čidel pro potřeby řízení tepelně-technických procesů energetických zařízení.

Abstrakt

Práce se primárně zabývá výběrem optimálního snímače teploty pro řízení ohřevu teplé vody ve výměníkové stanici, která trvale zásobuje určitou část sídliště teplou vodou. Snímače jsou vybírány z konkrétních průmyslových kovových odporových snímačů s platinovými a niklovými čidly. Optimalizační kritéria, na jejichž základě jsou snímače vícekriteriálně voleny, jsou pořizovací cena, časová odezva a nejistota měření snímače.

Dalším cílem práce je návrh parametrů regulátoru řídicího systému, který řídí celý proces ohřevu. Konkrétní parametry regulátoru nakonec zvoleny nebyly z důvodu značného omezení experimentů z důvodu nutnosti trvalého běhu výměníkové stanice.

Práce dále popisuje optimální snímač, který by umožnil přesnější regulaci teploty vody pro koncové spotřebitele, pokud by jím byl stávající snímač nahrazen.

Klíčová slova

Teplotní čidlo, senzor, snímač, řízení, regulace, regulátor, optimalizace, optimalizační úloha, výměníková stanice, výměník tepla, spirála, přechodová charakteristika.

Whole work name

Optimization of selecting thermal detectors to control technical processes of energetic systems.

Abstract

This work deals with a choice of an optimum temperature sensor to control hot water heating in a heat exchanger station, which supplies a certain part of a housing estate with hot water. The sensors are chosen from commercial industrial metal resistance sensors made from platinum and nickel. Optimization tasks for the choice of the best sensor are a purchase price, time response and measurement uncertainty of individual sensors.

Another goal of the work is to suggest parameters of a control system regulator. This regulator controls the whole heating process. Precise parameters of this regulator were not chosen because of significant limitations of experiments due to necessary continuous run of the whole heat exchanger station.

The work also describes an optimum sensor which could enable more precise temperature regulation of water for final consumers, if a current existing sensor was replaced by it.

Keywords

Thermal detector, sensor, control, regulation, controller, optimization, optimization task, junction heat exchange station, heat exchanger, spiral, plate, step response.

Obsah

Seznam použitých zkratek a symbolů ix

Kapitola 1 1
1 Úvod 1

Kapitola 2 3
2 Popis řízeného tepelně technického procesu 3
2.1 Popis a funkce výměníkové stanice 3
2.2 Princip ohřevu TV a regulace její teploty 4
2.3 Použité výměníky tepla a jejich principy 7
2.3.1 Spirálový výměník tepla – první fáze ohřevu 7
2.3.2 Deskový výměník tepla – druhá fáze ohřevu 8
2.4 Kondenzace topné páry a odvod kondenzátu 9
2.5 Vyhláška č. 194/2007 Sb. stanovující pravidla pro vytápění a dodávku TV 10

Kapitola 3 11
3 Snímače teploty 11
3.1 Technické parametry teplotních senzorů 11
3.1.1 Statické vlastnosti teplotních senzorů 11
3.1.2 Dynamické vlastnosti teplotních senzorů 13
3.2 Kovové odporové teplotní senzory 14
3.2.1 Odporový platinový snímač teploty 15
3.2.2 Odporový niklový snímač teploty 17
3.2.3 Měření teploty kovovými odporovými snímači teploty 18
3.3 Vybrané průmyslové snímače pro optimalizaci 20

Kapitola 4 23
4 Optimalizace 23
4.1 Stanovení optimalizačních úloh 23
4.2 Stanovení kriteriálních funkcí 24
4.2.1 Optimalizační úloha na minimum 24
4.3 Optimalizační úloha č. 1 – pořizovací cena snímače 25
4.4 Optimalizační úloha č. 2 – časová odezva snímače 25

4.5 Optimalizační úloha č. 3 – nejistota snímače 26
4.5.1 Příklad výpočtu nejistoty snímače pro měření teploty primární vody 27
4.5.2 Příklad výpočtu nejistoty snímače pro měření teploty TV v zásobníku 28
4.5.3 Řešení optimalizační úlohy na minimum 28
4.6 Výsledné vícekriteriální hodnocení 30
4.6.1 Stanovení vah jednotlivých optimalizačních úloh 30
4.6.2 Vyhodnocení vícekriteriální úlohy 31

Kapitola 5 33
5 Řídicí systém 33
5.1 Popis řídicího systému 33
5.2 Stávající regulátor ohřevu teplé vody 33
5.3 Identifikace soustavy a návrh parametrů regulátoru 34
5.3.1 Zjednodušený popis systému 35

Kapitola 6 38
6 Závěr 38

Seznam použité literatury I
Seznam obrázků a grafů II
Seznam tabulek III

Příloha A IV
A. Nezařazené obrázky a tabulky IV

Seznam použitých zkratek a symbolů

Zkratka	*Význam*	*Jednotka*
VS	výměníková stanice	
TV	teplá voda (oficiální termín používaný v legislativě)	
PV	primární voda (přímý ohřev TV)	
SCZT	soustava centrálního zásobování teplem	
ŘS	řídicí systém	
T	termodynamická teplota	(K)
t	teplota	(°C)
Q	teplo	(J)
Φ	tepelný tok	(W)
H	celkový entalpický tok	(W)
c_p	měrná tepelná kapacita horkého/chladného proudu výměníku	(J K^{-1} mol^{-1})
u	elektrické napětí	(V)
i	elektrický proud	(A)
Δx	absolutní chyba měření teploty	(°C)
δ_s	relativní chyba snímače	(−)
$\%\ FS$	procenta z měřicího rozsahu	(%)
x_{max}	nejvyšší hodnota z měřicího rozsahu	(°C)
x_{min}	nejnižší hodnota z měřicího rozsahu	(°C)
u_A	standardní nejistota měření teploty typu A	(°C)
u_B	standardní nejistota měření teploty typu B	(°C)
u_C	kombinovaná standardní nejistota měření teploty	(°C)
$U(x)$	rozšířená nejistota měření teploty	(°C)
$u_B(y)$	nejistota snímače teploty	(°C)
τ	časová odezva snímače, tj. doba dosažení 95 % ustálené hodnoty	(s)
Pt	chemická značka platiny	
Ni	chemická značka niklu	
R_0	odpor kovového odporového teplotního čidla při teplotě 0 °C	(Ω)
R_{100}	odpor kovového odporového teplotního čidla při teplotě 100 °C	(Ω)

W_{100}	poměr odporů teplotního čidla R_{100} a R_0	[-]
R_t	odpor kovového odporového teplotního čidla při teplotě *t*	(Ω)
α	teplotní součinitel odporu kovu	(K^{-1})
D	zatěžovací konstanta kovového odporového snímače	(mW K^{-1})
c_{MIN}	minimální pořizovací cena snímače dle optimalizační úlohy	(Kč)
τ_{MIN}	minimální časová odezva snímače dle optimalizační úlohy	(s)
$[u_B(y)]_{\mathrm{MIN}}$	minimální nejistota snímače dle optimalizační úlohy	(°C)
b_k	počet bodů přiřazených *k*-té optimalizační úloze	(−)
v_k	váha *k*-té optimalizační úlohy	(−)
$q_{i,k}$	hodnota pořadové funkce *i*-té varianty *k*-té optimalizační úlohy	(−)
s	obecné řešení vícekriteriální optimalizační úlohy	(−)
s_{OPT}	optimální řešení vícekriteriální optimalizační úlohy	(−)
$R(s)$	přenos regulátoru v operátorové oblasti Laplaceovy transformace	
k_P	zesilovací konstanta regulátoru	
T_I	integrační časová konstanta regulátoru	

Kapitola 1

1 Úvod

Tato bakalářská práce vznikla v rámci zakončení tříletého studia bakalářského oboru Kybernetika a měření ve studijním programu Elektrotechnika a informatika na fakultě elektrotechnické Českého vysokého učení technického v Praze.

Cílem této práce je nalezení optimálního snímače teploty, který svými vlastnostmi nejlépe vyhovuje potřebám řízení konkrétního tepelně technického procesu, a to ohřevu teplé vody ve výměníkové stanici. Volba snímače bude provedena z několika kovových odporových senzorů teploty, které se pro uvedenou praktickou aplikaci nejvíce využívají. Z nich je poté na základě zvolených technických a ekonomických optimalizačních kritérií vybrán optimální snímač pro dané použití.

Nutno podotknout, že volba senzoru je prováděna pro konkrétní výměníkovou stanici a řídicí systém. Výsledky práce mohou být podkladem pro další obdobné využití, ale je důležité si uvědomit, že jsou založeny na konkrétním praktickém problému.

Mimo nalezení optimálního senzoru je cílem této práce také návrh parametrů použitého řídicího systému tak, aby bylo ve výsledku možné uvést celý systém do provozu v souladu se splněním zákonem daných norem o pravidlech pro vytápění a dodávce teplé vody.

V následující kapitole se budu zabývat úvodní teorií nezbytnou k pochopení dané problematiky, a to zejména popisem celého technického procesu a funkce výměníkové stanice, tepelnými výměníky, vedením tepla a principem ohřevu teplé vody.

Třetí kapitola pojednává o teplotních senzorech a měření teploty. Zabývám se zde jak obecnou problematikou, tak i konkrétními funkčními principy a vlastnostmi jednotlivých typů

snímačů. Velice podstatnou část této kapitoly tvoří výčet a popis parametrů konkrétních průmyslových snímačů, které jsou předmětem optimalizace.

Samotné optimalizaci a jednotlivým optimalizačním kritériím je věnována kapitola čtvrtá. Zde jsou popsány jednotlivé optimalizační úlohy, jejich řešení a výsledky vedoucí k „optimálnímu“ senzoru pro řízení procesu ohřevu teplé vody dle zvolených kritérií.

Pátá kapitola je věnována samotnému řízení. Popisuje konkrétně funkce a vlastnosti použitého řídicího systému, identifikaci řízeného tepelného procesu a pojednává o návrhu parametrů regulátoru.

V závěru celé práce se zaměřím na posouzení správnosti volby použitého snímače vzhledem k daným optimalizačním kritériím, podrobím jej srovnání s ostatními snímači, které jsou předmětem volby, a dále se budu zabývat správnou funkčností řídicího systému vzhledem k požadavkům na regulaci.

Kapitola 2

2 Popis řízeného tepelně technického procesu

Jak již bylo řečeno v úvodu, procesem, pro jehož řízení optimalizuji výběr teplotního čidla, je ohřev teplé vody (dále jen TV) ve výměníkové stanici. Následující text tedy popisuje její funkci a dopodrobna rozebírá jednotlivé fyzikální procesy a principy, kterých využívá.

2.1 Popis a funkce výměníkové stanice

Výměníková stanice, kterou se budu v celé práci zabývat, nese označení VS POS 7 a je situována v Ústí nad Labem, městské části Severní Terasa, Krušnohorská 3078/3. Ohřev teplé vody probíhá v samostatném okruhu, zcela odděleného od ohřevu topné vody pro otop. Hlavními částmi tohoto okruhu jsou z hlediska energetiky přívody topné páry, tepelné výměníky, topný okruh pro vlastní ohřev TV a zásobník pro odběr již ohřáté TV. Z hlediska regulace a elektrotechniky se jedná hlavně o rozvaděče, vlastní řídicí systém a snímače teploty, které zajišťují zpětnou vazbu pro řídicí systém a pro moji práci jsou nejpodstatnější.

Ohřev TV probíhá ve dvou fázích, přičemž první z nich zajišťuje svislý spirálový nerezový protiproudový výměník pára – primární voda, druhou pak dvojice deskových výměníků primární voda – TV. Topná pára je přiváděna ze soustavy centrálního zásobování teplem (SCZT). Tato pára má při přívodu do výměníkové stanice tlak 1,45 MPa a teplotu 240 °C. Maximální hodinový průtok této páry je 1 500 kg hod^{-1}. Tyto parametry jsou dány přímo SCZT. Vzhledem k tomu, že výměníky jsou často stavěny na nižší hodnoty tlaku, teploty a rozdíl teplot na teplosměnných plochách výměníku by byl příliš velký, je pára před jejím využitím pro ohřev redukována na tlak 0,4 MPa a teplotu 150 °C. V případě původního tlaku by byl regulační ventil, který zajišťuje regulaci přívodu páry do primárního okruhu svislého spirálového výměníku, mnohem více namáhán a příliš velký tlak by způsoboval problémy v regulaci teploty primární vody tím způsobem, že tlak média, který prochází

ventilem, ovlivňuje rychlost jeho uzávěru. To by zbytečně nepříznivě ovlivnilo rychlost akčního zásahu. O bližším významu této redukce pojednávají také podkapitoly 2.2 až 2.4.

V první fázi ohřevu TV je do primárního okruhu (také horký proud) svislého spirálového výměníku přivedena již zredukovaná pára. V sekundárním okruhu (také chladný proud) spirálového výměníku cirkuluje primární voda, která je ohřívána touto párou.

Teplota primární vody je dána velikostí akčního zásahu a pohybuje se v rozmezí (75–80)°C při konstantním tlaku 1 MPa. Primární voda zároveň vstupuje do primárních okruhů deskových výměníků, ve kterých se ve druhé fázi ohřevu ohřívá na sekundárním okruhu deskových výměníků již TV, která je následně akumulována v zásobnících a regulována na teplotu 60 °C.

Ohřátá TV je ze zásobníků neustále dodávána do rozvodné sítě a za pomoci cirkulačních čerpadel, které jsou umístěny také ve VS, se vrací zpět do akumulační nádoby. Tato nepřetržitá cirkulace TV je nutná z toho důvodu, aby u spotřebitele byla vždy k dispozici na jejím výtoku. Část tepla se z důvodu nedokonalé izolace a vedením vody ztratí, proto se voda z cirkulace vrací zpět s teplotním spádem cca (10–20)°C. V případě odběru TV spotřebitelem se nádoba dopouští předehřátou studenou vodou o teplotě cca 15 °C. O předehřevu studené vody a celém procesu ohřevu a regulace teploty TV podrobněji pojednávají následující podkapitoly.

2.2 Princip ohřevu TV a regulace její teploty

Dle vyhlášky č. 194/2007 Sb., kterou se stanoví pravidla pro vytápění a dodávku teplé vody (viz podkapitola 2.5), má být teplá voda dodávána celoročně tak, aby na výtoku u koncového spotřebitele měla teplotu (45–60)°C [12]. V případě VS POS 7 se voda v zásobníku pro odběr reguluje na stálou teplotu 60 °C.

Regulace teploty TV v zásobníku je řízena PI regulátorem, který reguluje teplotu primární vody ohřívané topnou parou, přičemž velikost žádané hodnoty závisí na aktuální teplotě TV v zásobníku. Tato závislost je graficky vyjádřena na obrázku 2.2 a nutno podotknout, že vztah je zcela lineární. K sepnutí ohřevu dochází v případě, že teplota TV v zásobníku klesne na teplotu 57 °C, např. vlivem odběru a dopouštění studené vody.

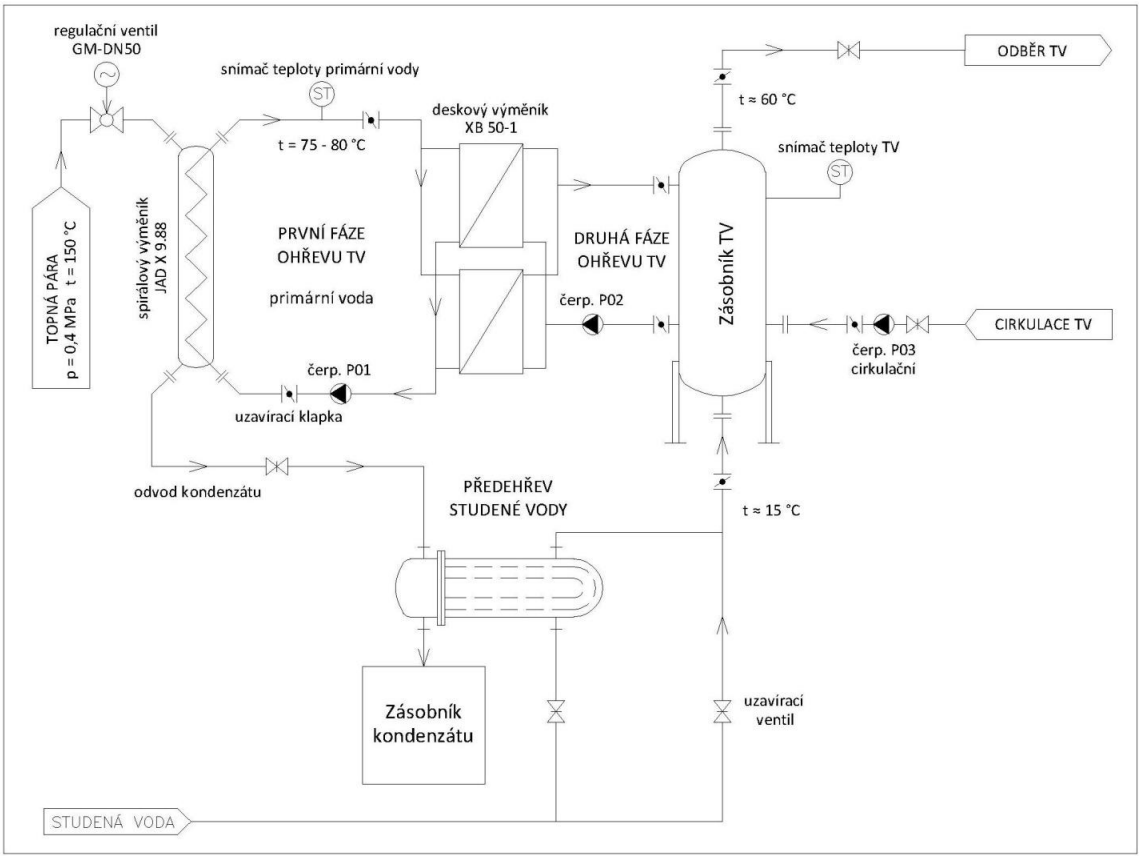
V případě poklesu teploty TV až na 50 °C se teplota primární vody reguluje na 80 °C (viz obrázek 2.2). Primární voda následně ohřívá přes deskové výměníky TV v zásobníku do doby, než TV dosáhne opět teploty 60 °C. Následně je proces ohřevu ukončen, regulátor uzavře pomocí ventilu přísun topné páry a teplota primární vody se samovolně ochlazuje, dokud není ohřev opět sepnut vlivem poklesu teploty TV v zásobníku.

Je tedy patrné, že pro účel regulace je nutné odečítat dvě hodnoty teploty, teplotu TV v zásobníku a teplotu primární vody ohřívané párou. Toto zajišťují dva snímače teploty připojené k řídicímu systému, jejichž volbou a optimalizací se v této práci primárně zabývám.

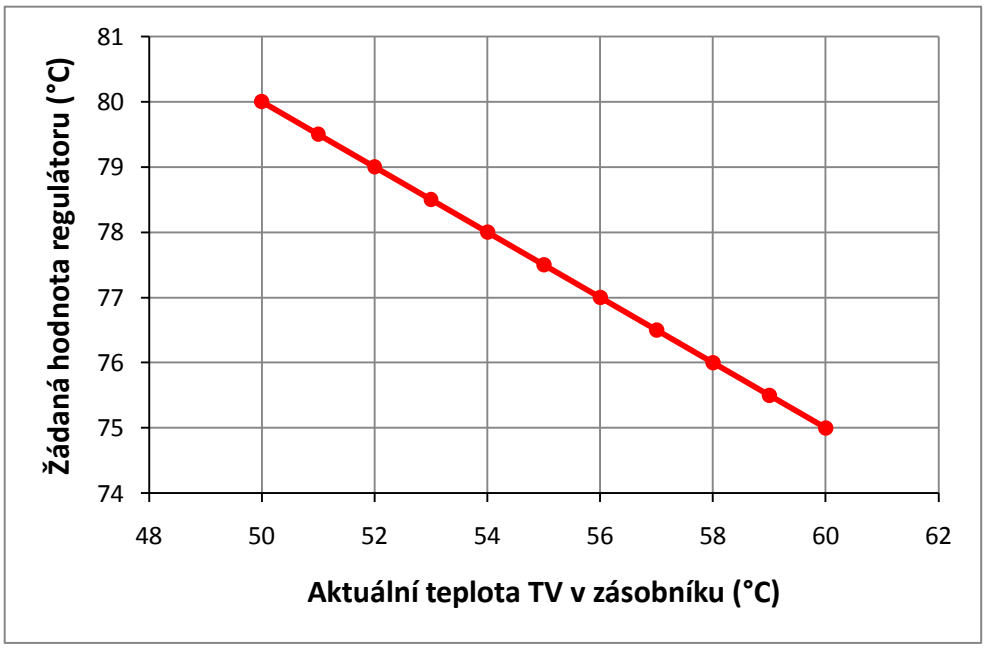
Akčním členem regulátoru je dvoucestný dvoupolohový uzavírací regulační ventil GM-DN50 2H.50.230 s havarijní funkcí a elektrickým pohonem Honeywell 230 V AC, který reguluje přísun páry do primárního okruhu svislého spirálového výměníku. Důležitým prvkem procesu ohřevu jsou také nabíjecí čerpadla P01 a P02 (viz obrázek 2.1), která jsou zapnuta v počátku ohřevu, tedy v případě poklesu teploty TV na 57 °C. Zatímco čerpadlo P01 je vypnuto bezprostředně po dohřátí TV na 60 °C, čerpadlo P02 má regulátorem nastaven 10 min doběh, aby se využilo všechno teplo, které předává primární voda pomocí deskových výměníků.

Také se zde nabízí otázka, proč je TV ohřívána dvoufázově a ne přímo párou v jednom okruhu. Představme si tedy, že ohřev TV provádíme v jednom okruhu s jedním výměníkem. Jak již bylo zmíněno v podkapitole 2.1, má pára pro ohřev primární vody teplotu 150 °C. V případě špičkového odběru TV ze zásobníku a jejímu doplňování studenou vodou může dojít k poklesu její teploty krátce pod 50 °C, než jej regulátor stihne doregulovat.

Lze jednoduše spočítat, že rozdíl teplot v primárním a sekundárním okruhu výměníku, $\Delta t = 150 - 50 = 100\ °C$ i více, by byl pro výměník příliš velký. Takový rozdíl teplot zapříčiňuje mnohem vyšší namáhání, opotřebení a zanášení výměníku vlivem usazování inkrustací (viz podkapitola 2.4). Řešení pomocí dvou okruhů, které spojuje primární voda o teplotě (75–80)°C, se ukázalo jako mnohem lepší už z hlediska menších tepelných ztrát či opotřebení.



Obrázek 2.1 - Principiální schéma výměníkové stanice POS 7



Obrázek 2.2 - Závislost žádané hodnoty regulátoru na teplotě TV v zásobníku

2.3 Použité výměníky tepla a jejich principy

V úvodu této kapitoly se budu nejprve zabývat obecnými principy výměníků a jejich vlastnostmi, níže jsou poté konkrétněji rozebrány typy obou výměníků, které jsou použity v procesu ohřevu TV. Základem procesního schématu výměníků jsou horké proudy (primární okruh), z nichž se teplo odebírá a chladné proudy (sekundární okruh), do kterých je teplo dodáváno z primárního okruhu, přičemž teploty médií v obou okruzích a jejich hmotnostní průtok jsou dány technologickými požadavky daného procesu, do kterého má být výměník integrován (v našem případě ohřev TV). Touto problematikou se konkrétněji zabývá metoda tzv. technologie „pinch“, která stanovuje poměrně obecná pravidla integrace výměníku do daného procesu a optimalizuje výměnu tepla mezi horkými a chladnými proudy [1].

Metoda je založena na tzv. kompozitních křivkách horkých a chladných proudů, které představují závislosti teploty *T (*K) na celkovém tepelném toku za konstantního tlaku (entalpický tok) jednotlivých proudů *H* (W). Každý z těchto proudů lze charakterizovat rovnicí $\Delta H = Mc_p\Delta T$, která popisuje změnu toku entalpie v závislosti na hmotnostním průtoku *M* a teplotě *T*, které jsou, jak již bylo řečeno, dány technologickými požadavky konkrétního procesu. Kompozitní křivky, každá pro horký i chladný proud, jsou pak dány jako součty přírůstků entalpických toků ΔH. Představme si tedy T-H diagram, který obsahuje právě dvě kompozitní křivky, kdy křivka horkého proudu je umístěna nad křivkou proudu chladného. Jejich vzájemnou horizontální polohou lze stanovit využitý procesní tepelný výkon, což je důležité pro návrh a výběr výměníku pro konkrétní technologický proces. Nalezením optimální polohy kompozitních křivek, která značně ovlivňuje energetické nároky procesu a investiční ceny výměníků, se právě zabývá zmíněná „pinch“ technologie [1].

Více se touto problematikou, která je velice obsáhlá, zabývat nebudu, jelikož to není předmětem této práce. Pro pochopení základního principu volby a funkce tepelných výměníků je tato informace dostačující.

2.3.1 Spirálový výměník tepla – první fáze ohřevu

První fázi ohřevu, tedy ohřev primární vody párou, zajišťuje spirálový protiproudový nerezový svislý výměník. Svislé výměníky patří svojí konstrukční podstatou k deskovým

výměníkům, kdy obě média proudí v protiproudu ve spirálově zakřivených kanálech. Jednotlivé spirálové výměníky se liší v počtu spirál, kdy právě zakřivení kanálů má za následek vyšší výkon a v použitém materiálu (převážně měď nebo nerezová ocel). Výhodou spirálových výměníků je relativní kompaktnost (díky spirálovému zakřivení mají větší teplosměnnou plochu), malý sklon k zanášení (viz dále) a nízké tlakové ztráty, nevýhodou je tlakové omezení, což je také jedním z důvodů redukce topné páry po přívodu ze soustavy centrálního zásobování teplem (SCZT) [1].

Konkrétním výměníkem použitým v popisovaném procesu k ohřevu primární vody párou je výměník typu JAD X 9.88 od společnosti SECESPOL-CZ, s.r.o. Jedná se o spirálový trubkový výměník se šroubovicovými trubkami uspořádanými do tvaru písmene X. Disponuje teplosměnnou plochou o velikosti 10,7 m^2, jeho nejvyšší pracovní tlak je 1,6 MPa a pracovní teplota 203 °C. Jmenovitý výkon výměníku je 1 000 kW. Parametry a pracovní podmínky výměníku jsou tedy dostačující pro danou aplikaci, viz parametry topné páry v primárním okruhu výměníku a primární vody vystupující z jeho sekundárního okruhu.

Obecným problémem výměníků je jejich zanášení inkrustacemi, tedy tvorba povlaků, hlavně minerálů. To má za následek jeho postupné ucpávání, což způsobuje vznik termického odporu ve výměníku. Zanášení výměníků je přirozený jev, který je způsobený předáváním tepla mezi médii s rozdílnou teplotou. Čím je tento rozdíl vyšší, tím je uvolňování a usazování inkrustací vyšší. Z toho důvodu je ohřev TV řešen dvoufázově právě tak, jak je popsáno v podkapitole 2.2.

2.3.2 Deskový výměník tepla – druhá fáze ohřevu

Deskové plátové výměníky patří mezi jedny z nejpoužívanějších a jsou používány téměř výhradně s kapalinovými médii. V našem tepelném procesu zajišťují ohřev TV ve druhé fázi s primární vodou jako horkého proudu. Média proudí ve štěrbinách mezi na sobě naskládanými deskami z nerezové oceli [1].

Deskové výměníky tepla mají malý sklon k zanášení, ale ve srovnání s výměníky spirálovými jsou na tom z tohoto hlediska o něco hůře. Jejich nevýhodou je drobná netěsnost, což ale kompenzují ještě větší kompaktností než spirálové výměníky, nízkou

cenou a konstrukcí pro vysoké tlaky. Výhodou deskových výměníků je rychlá odezva na regulační zásah, což je dáno jejich malým vodním objemem [1].

V daném procesu byl použit výměník od společnosti Danfoss s.r.o. Jedná se o nerezový deskový pájený výměník XB 50-1, který disponuje teplosměnnou plochou o velikosti 5,68 m^2 a poskytuje tepelný výkon 500 kW. Maximální provozní teplota výměníku je 180 °C a tlak 2,5 MPa.

2.4 Kondenzace topné páry a odvod kondenzátu

Kondenzace vodní páry je skupenská přeměna, kdy pára přechází z plynného stavu do stavu kapalného vlivem snižování její teploty. V první fázi ohřevu, tedy ohřívání primární vody parou ve spirálovém výměníku, předává topná pára teplo primární vodě, jednoznačně tedy snižuje svoji teplotu a kondenzuje. U výměníků tepla se říká, že dochází k tvorbě kondenzátu.

Pro zachování vysoké tepelné účinnosti výměníku je nutné trvale odvádět kondenzát, který vzniká na teplosměnných plochách výměníku. V opačném případě by docházelo ke zvětšování kondenzátní vrstvy, která tvoří nežádoucí tepelný odpor. Značný vliv má také kvalita samotné páry, která vstupuje do primárního okruhu výměníku. Pokud by se jednalo o tzv. mokrou páru, tedy směs páry a kapiček kondenzátu, vznik tepelných ztrát by byl o to větší.

Odvod kondenzátu ve výměníkové stanici POS 7 je veden přes chladič kondenzátu a zbytkové teplo v něm obsažené je využito pro předehřev studené vody dopouštěné do zásobníků s TV. Kondenzát je následně veden společným odvodným potrubím pro celou výměníkovou stanici do sběrné nádoby, odkud se vrací zpět do SCZT k dalšímu zpracování.

K odvodňování páry dochází postupně po celé potrubní trase, kterou je dodávána do VS ze SCZT pomocí separátorů vlhkosti. Během své trasy pára postupně odevzdává teplo do okolí, což způsobuje její kondenzaci. Toto odvodňování je prováděno mimo proces ohřevu teplé vody a okruh měření a regulace.

2.5 Vyhláška č. 194/2007 Sb. stanovující pravidla pro vytápění a dodávku TV

Vyhláška č. 194/2007 Sb. stanovuje pravidla pro vytápění a dodávku teplé vody, měrné ukazatele spotřeby tepelné energie pro vytápění a pro přípravu teplé vody a požadavky na vybavení vnitřních tepelných zařízení budov přístroji regulujícími dodávku tepelné energie konečným spotřebitelům [12].

§ 4 (1): Teplá voda je dodávána celoročně tak, aby měla na výtoku u spotřebitele teplotu (45–60)°C s výjimkou možnosti krátkodobého poklesu v době odběrných špiček spotřeby v zúčtovací jednotce [12].

Na základě § 4 je tedy stanovena hodnota, na kterou se reguluje TV v zásobovací nádrži na 60 °C, přičemž je povoleno ochlazení až na 50 °C v případě špičkových odběrů TV (viz podkapitola 2.2). Interval těchto hodnot je tedy v souladu s danou vyhláškou.

Kapitola 3

3 Snímače teploty

Kapitola věnovaná snímačům a teplotním čidlům tvoří velice podstatnou část této práce. V jejím úvodu jsou popsána teplotní čidla obecně, jejich principy a vlastnosti, následně kapitola pojednává o parametrech samotných snímačů a čidel, které jsou předmětem volby.

Snímač teploty nebo také teplotní senzor zpravidla tvoří vstupní blok měřicího řetězce. Hlavní součástí teplotního senzoru je teplotní čidlo, které převádí teplotu na jinou vhodnou fyzikální veličinu na základě určitého fyzikálního principu [5]. Mezi velmi často používané snímače teploty v praxi patří odporové kovové senzory, na které je tato práce zaměřena, a pro snímání teploty proudících kapalin se hodí nejvíce, což je i případ ohřevu TV.

3.1 Technické parametry teplotních senzorů

3.1.1 Statické vlastnosti teplotních senzorů

Statická charakteristika [5]

Statická charakteristika senzoru udává funkční závislost mezi měřenou veličinou *x* (teplota) a transformovanou veličinou *y* v časově ustáleném stavu. Matematicky lze jednoduše zapsat $y = f(x)$.

Tato závislost je popsána obecným polynomem *n*-tého řádu:

$$y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \cdots + a_n x^n \tag{3.1}$$

V ideálním případě má pak statická charakteristika předpis $y = Kx$, kde *K* je citlivost senzoru a současně také konstanta přenosu.

Pokud si představíme výše zmíněnou funkční závislost obecně, pak je tato citlivost *K* definována pomocí přírůstků dílčích veličin *Δx* a *Δy*, a to takto:

$$K = \lim_{\Delta x \to 0} \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{df(x)}{dx} \tag{3.2}$$

Dynamický rozsah snímače je dán intervalem přípustných hodnot snímané fyzikální veličiny [5] a přestavuje takový rozptyl hodnot, který je snímač schopen zaznamenat a zároveň dodržet výrobcem předepsanou přesnost měření.

Absolutní chyba

Pomocí absolutní chyby se nejčastěji vyjadřuje přesnost snímačů udávaná výrobcem, a to buď přímo, nebo také ve formě % z měřicího rozsahu (% FS) [4].

Relativní chyba

Relativní chyba snímače je dána vztahem [5]:

$$\delta_s = \frac{(\Delta \mathrm{x})_{\max}}{\mathrm{x}_{\max} - \mathrm{x}_{\min}} \ (-) \tag{3.3}$$

$(\Delta \mathrm{x})_{\max}$ je nejvyšší možná hodnota absolutní chyby snímače

x_{max} je nejvyšší hodnota z měřicího rozsahu

x_{min} je nejnižší hodnota z měřicího rozsahu

Nejistoty měření

V současné době je vyjadřování přesnosti měření pomocí relativní chyby senzorů nahrazováno stanovováním nejistot měření. Nejistota měření je parametr přiřazený k výsledku měření, charakterizující rozptyl hodnot, které lze s určitou pravděpodobností přiřadit k měřené veličině. Lze tedy říci, že představuje interval hodnot okolo výsledné naměřené hodnoty, ve kterém s určitou pravděpodobností leží hodnota pravá. Výsledná nejistota obsahuje ve většině případů řadu složek, které vyplývají z různých zdrojů nejistot [5].

Nejistotu měření lze vyjádřit a vyhodnotit mnoha způsoby, které závisí na konkrétní aplikaci a možnostech. Standardně rozlišujeme standardní nejistoty typu A a B, značené u_A a u_B, kombinovanou standardní nejistotu u_C a rozšířenou nejistotu, která se značí $U(x)$.

Pro moji práci bude nejpodstatnější stanovení nejistot jednotlivých snímačů, které jsou předmětem optimalizace. Nejistota snímače je jedním ze základních zdrojů výsledné standardní nejistoty měření typu B. Zahrnuje například třídu přesnosti daného snímače a nelinearitu statické charakteristiky. Nejistoty snímače jsou blíže popsány v kapitole 4.

3.1.2 Dynamické vlastnosti teplotních senzorů

Dynamické vlastnosti teplotních senzorů je nutné znát pro analýzu regulačních systémů. Pro tuto práci, která je částečně založena na řízení procesu ohřevu TV, je tedy jejich znalost podstatná.

Měřená teplota, stejně jako kterákoli jiná fyzikální veličina, se neustále mění v čase. Výstupní signál senzoru y pak musí sledovat teplotu s minimálním zkreslením. Proto jsou stanoveny dynamické vlastnosti senzorů, které se popisují převážně diferenciálními rovnicemi prvního a druhého řádu. Grafickým vyjádřením bývá nejčastěji přechodová charakteristika (odezva senzoru na jednotkový skok teploty) a rychlostní charakteristika (odezva senzoru na změnu teploty konstantní rychlostí). Přechodová charakteristika je popsána přechodovou funkcí, rychlostní charakteristika rychlostní funkcí. Nejčastěji je výrobcem udávána hodnota časové konstanty τ, tedy doby, za kterou odezva na skokovou změnu měřené teploty dosáhne 63,2 % z ustálené hodnoty nebo tzv. doba odezvy, tj. čas, za který dosáhne odezva hodnoty 95 % z hodnoty ustálené [5].

Statické a dynamické vlastnosti jednotlivých senzorů jsou udávány jejich výrobci a přesněji popisují chování senzoru v konkrétní aplikaci. Tato práce poskytuje pouze jejich stručný výčet a popis, potřebný pro správnou volbu senzoru a její optimalizaci. Často se udávají ještě další parametry jako rozlišitelnost a reprodukovatelnost senzoru, offset, práh citlivosti, linearita a přesné parametry výstupu.

3.2 Kovové odporové teplotní senzory

Kovové odporové senzory teploty patří mezi nejpoužívanější senzory pro měření teploty v průmyslových aplikacích. Literatura [5] dokonce uvádí, že jsou považovány za nepsaný průmyslový standard pro měření teploty. Jejich základní fyzikální princip je založen na závislosti odporu kovu na teplotě. Pro malý rozsah teplot od 0 °C do 100 °C lze tuto závislost s určitou nejistotou vyjádřit ve tvaru:

$$\boldsymbol{R_t = R_0(1 + \alpha t)\ (\Omega)} \tag{3.4}$$

R_0 (Ω) je odpor teplotního čidla při teplotě 0 °C

α (K^{-1}) je teplotní součinitel odporu kovu.

Teplotní součinitel odporu α je definován následujícím vztahem:

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{100\ R_0}\ \ (K^{-1}) \tag{3.5}$$

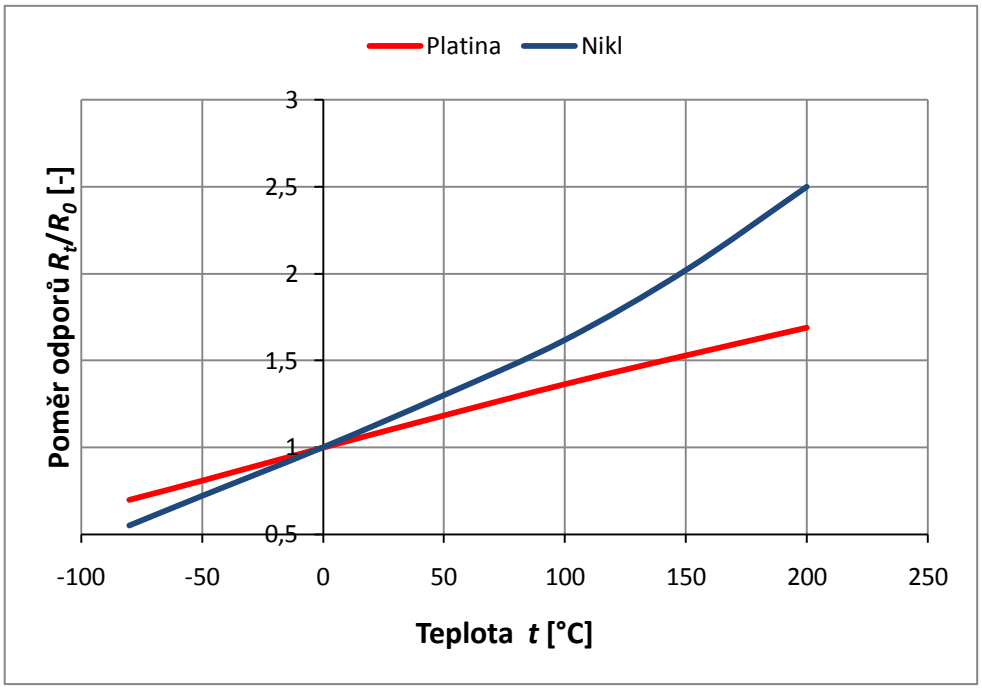
R_{100} (Ω) je odpor teplotního čidla při teplotě 100 °C.

U odporových snímačů teploty je také definován poměr odporů čidla při teplotě 100 °C a 0 °C, který se obvykle značí písmenem W_{100}.

$$W_{100} = \frac{R_{100}}{R_0}\ \ (-) \tag{3.6}$$

Jak bylo v předchozím odstavci řečeno, tyto obecné lineární vztahy platí pouze pro rozmezí teplot od 0 °C do 100 °C, což je pro praktická měření značně omezující fakt, jelikož je často potřeba měřit teplotu v mnohem větším rozsahu. Průmyslová měřicí čidla toto samozřejmě umožňují, přičemž vztah pro teplotní závislost měřicích odporů na teplotě jednotlivých kovů, ze kterých se průmyslová čidla vyrábějí, je určitou modifikací vztahu (3.4).

Nejrozšířenějšími kovy pro výrobu odporových kovových senzorů jsou platina, nikl a měď, případně některé jejich slitiny. Já se ve své práci budu věnovat jen nejpoužívanějším z nich, tedy platinovým a niklovým.



Obrázek 3.1 - Teplotní závislost kovových odporových senzorů

Tabulka 3.1 - Teplotní závislost základních materiálů senzorů [5]

Použitý materiál	$\alpha \cdot 10^2$ (K^{-1})	Rozsah teplot (°C)	Poměr odporů W_{100}
Platina (Pt)	0,385 až 0,391	-200 až +850	1,385
Nikl (Ni)	0,617 až 0,675	-70 až +200	1,618

3.2.1 Odporový platinový snímač teploty

Platinový senzor teploty je mezi kovovými odporovými senzory nejpoužívanější. Vyznačuje se velkým rozsahem teplot, chemickou netečností, časovou stálostí a vysokou teplotou tání [5].

V praxi nejpoužívanějším platinovým senzorem je Pt 100 dle normy IEC-ČSN 751, přičemž hodnota přiřazená Pt udává velikost odporu R_0. Čistota platiny se pohybuje mezi 99,9 a 99,999 %. Na základě normy IEC-ČSN 751 se platinové měřicí odpory dělí do dvou tolerančních tříd A a B.

Třída A stanovuje použití senzoru v rozmezí teplot od -200 °C do +650 °C, třída B pak od -200 °C do +850 °C.

Teplotní závislost měřicího odporu platinového čidla na teplotě je:

$$\boldsymbol{R_t = R_0[1 + At + Bt^2 + Ct^3(t - 100)]\ (\Omega)} \qquad t \in \langle -200\ ;\ 0\rangle\ (°\mathrm{C}) \tag{3.7}$$

$$\boldsymbol{R_t = R_0(1 + At + Bt^2)\ (\Omega)} \qquad t \in \langle 0\ ;\ +850\rangle\ (°\mathrm{C}) \tag{3.8}$$

$R_0 = 100\ \Omega$

$A = 3{,}90802 \cdot 10^{-3}\ \mathrm{K}^{-1}$

$B = -5{,}80195 \cdot 10^{-7}\ \mathrm{K}^{-2}$

$C = -4{,}27350 \cdot 10^{-12}\ \mathrm{K}^{-4}$ $\qquad t < 0\ °C$

$C = 0$ $\qquad t > 0\ °C$

Hodnoty odporu jsou v závislosti na teplotě zatíženy určitou chybou. U odporového čidla Pt 100 je při teplotě 0 °C tato chyba $\pm 0{,}06\ \Omega$ pro třídu A, respektive $\pm 0{,}12\ \Omega$ pro třídu B [5]. Platinové odporové senzory třídy B jsou obecně zatíženy větší chybou než senzory třídy A pro stejnou hodnotu teploty (°C).

Průmyslové kovové odporové snímače teploty jsou vyráběny ve třídě přesnosti A nebo B, která stanovuje mez nejistoty snímače za specifikovaných podmínek. Toleranci těchto hodnot udává norma IEC-ČSN 751, graficky znázorněno na obrázku 3.2. Pro dovolené odchylky platinových měřicích odporů platí následující podmínky [5]:

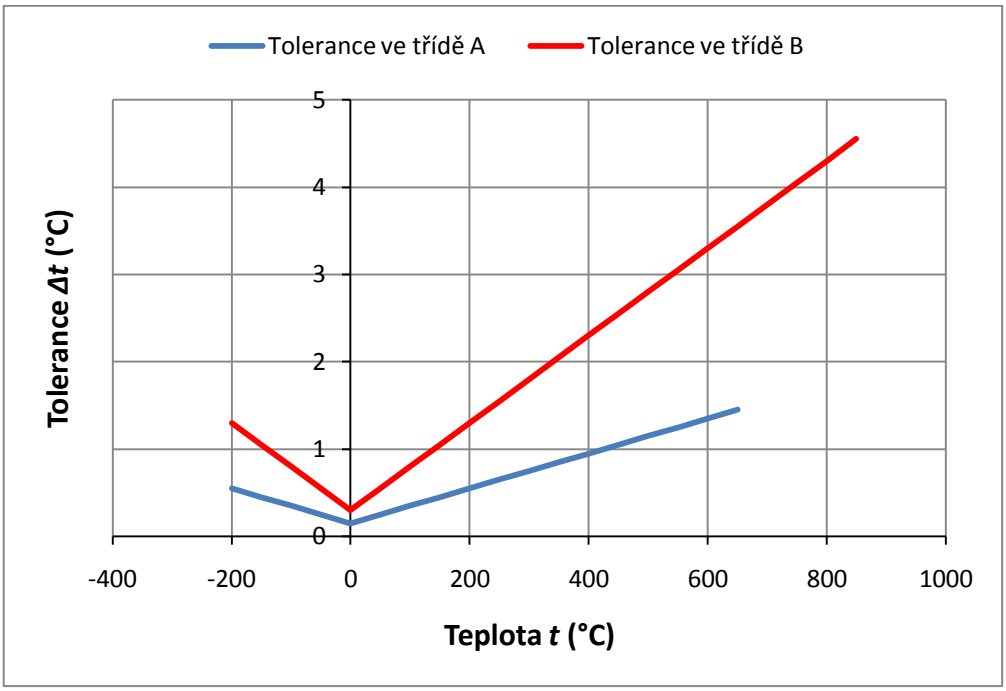
Třída přesnosti A:

$$\Delta t = \pm(0{,}15 + 0{,}002 \cdot |t|)\ (°\mathrm{C}) \tag{3.9}$$

Třída přesnosti B:

$$\Delta t = \pm(0{,}30 + 0{,}005 \cdot |t|)\ (°\mathrm{C}) \tag{3.10}$$

Kromě základní hodnoty odporu $R_0 = 100\ \Omega$ jsou teplotní senzory vyráběny s udávanou základní hodnotou odporu $R_0 =$ 50, 200, 500, 1000 a 2000 Ω [5].



Obrázek 3.2 - Dovolené tolerance průmyslových Pt měřicích odporů dle IEC 751 [5]

3.2.2 Odporový niklový snímač teploty

Niklové čidlo kovového odporového senzoru teploty je v praxi často používané pro svoji vysokou citlivost a rychlou časovou odezvu. Má také velmi malé rozměry. Oproti platinovému čidlu ale zdaleka nenabízí tak veliký teplotní rozsah a z obrázku 3.1 je patrná také nelinearita tohoto čidla.

Teplotní závislost odporu na teplotě popisuje vztah:

$$\boldsymbol{R_t = R_0(1 + At + Bt^2 + Ct^4 + Dt^6)\ (\Omega)} \tag{3.11}$$

$R_0 = 100\ \Omega$

$A = 5{,}485 \cdot 10^{-3}\ \mathrm{K}^{-1}$

$B = 6{,}65 \cdot 10^{-6}\ \mathrm{K}^{-2}$

$C = 2{,}805 \cdot 10^{-11}\ \mathrm{K}^{-4}$

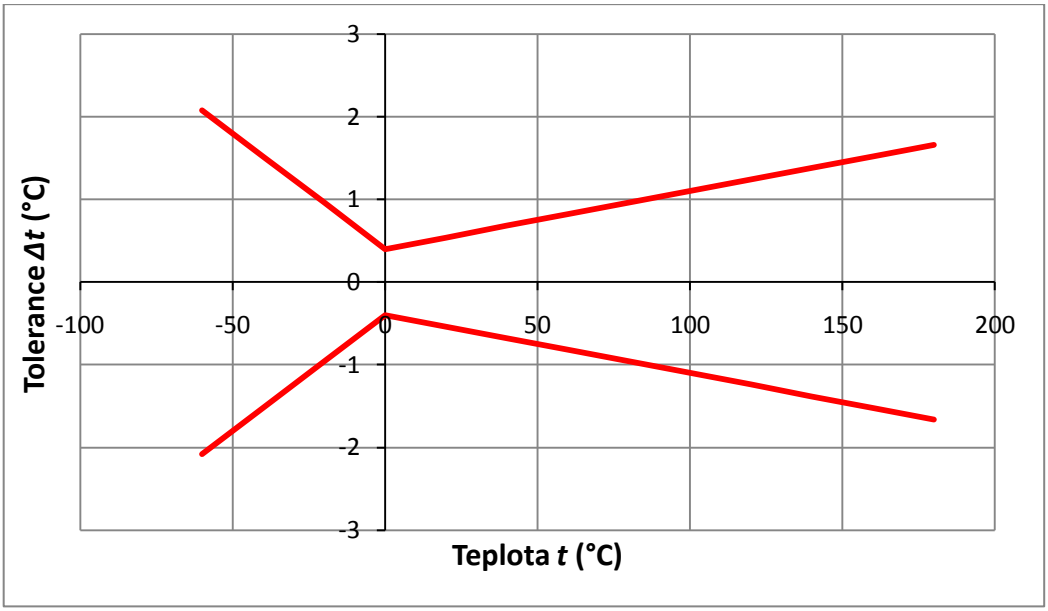
$D = 2{,}0 \cdot 10^{-17}\ \mathrm{K}^{-6}$

Dovolené tolerance odporu niklového čidla stanovuje norma DIN 43760, graficky vyjádřeno na obrázku 3.3. Platí [5]:

$$\Delta t = \pm(0{,}4 + 0{,}007 \cdot |t|)\ (°C) \qquad t > 0\ °C \tag{3.12}$$

$$\Delta t = \pm(0{,}4 + 0{,}028 \cdot |t|)\ (°C) \qquad t < 0\ °C \tag{3.13}$$

Podobně jako u odporového platinového čidla se vyrábějí i senzory se základní hodnotou odporu R_0 = 100, 200, 500, 1000 a 2000 Ω.



Obrázek 3.3 - Dovolené tolerance průmyslových Ni měřicích odporů dle DIN 43760 [5]

Kromě čistého niklu se pro výrobu teplotních odporových čidel používají slitiny niklu např. s manganem, což umožňuje zvýšit rozsah teplot a přitom zachovat relativně vysokou citlivost a odezvu snímače.

3.2.3 Měření teploty kovovými odporovými snímači teploty

Měření teploty v praxi je doprovázeno několika nežádoucími vlivy a při zapojení snímače do měřicího řetězce je nutné s nimi počítat. Jedná se zejména o vliv měřicího proudu, který čidlem prochází, vliv odporu vedení k měřicímu odporu a nelineární závislost odporu snímače na teplotě.

Vliv měřicího proudu procházejícího čidlem

Průchodem měřicího proudu odporem dochází k jeho zahřívání, což vede k tomu, že snímač indikuje vyšší teplotu, než je skutečná měřená hodnota. Nejistotu měření způsobenou tímto ohřevem popisuje rovnice:

$$\Delta \boldsymbol{T} = \frac{\boldsymbol{R_t I^2}}{\boldsymbol{D}} \quad (\mathbf{K}) \tag{3.14}$$

R_t (Ω) je hodnota měřeného odporu

I (mA) je měřící proud procházející měřeným odporem

D $(\mathrm{mW\ K^{-1}})$ je zatěžovací konstanta

Zatěžovací konstanta je dána prostředím, ve kterém je měření prováděno. Čím vyšší je tato hodnota, tím bude nejistota měření teploty menší. Velikost zatěžovací konstanty lze snížit minimalizováním tepelného odporu mezi použitým čidlem a měřeným prostředím.

Vliv odporu vedení k měřicímu odporu

Pro přesné měření teploty je nutné, aby hodnota měřicího odporu vyhodnocená snímačem byla co nejpřesnější. Odpor přívodů, často vyrobených např. z mědi, se mění se zvyšující se teplotou a jeho velikost není zanedbatelná. Tuto chybu lze odstranit vhodným třívodičovým nebo čtyřvodičovým zapojením ve vyváženém Wheatstoneově můstku nebo aktivním můstku. Tím se teplotní vliv odporu vedení kompenzuje. Jednotlivá zapojení odporových snímačů popisuje např. literatura [5].

Jinou možností připojení snímače k řídicímu či měřícímu systému je využití proudového nebo napěťového převodníku, kde se odpor čidla převádí na elektrický proud či napětí v daném rozsahu, zpravidla jednotek až desítek mA, respektive jednotek až desítek V.

Nelineární závislost odporu snímače na teplotě

V ideálním případě by měla být závislost odporu na teplotě lineární. Z obr. 3.1 je patrné, že tomu tak není, a to více u niklového čidla než např. platinového. Pro správné měření teploty je tedy nutné provést linearizaci statické převodní charakteristiky digitálními

nebo analogovými metodami. Nejpoužívanější metody analogové linearizace využívají zpětnovazebních zapojení, přičemž základní princip spočívá v regulaci měřicího proudu nebo napájecího napětí, současně s vhodným zapojením snímače (viz vliv odporu vedení).

Pro rozsah teplot od 0 °C do 100 °C je u platinového odporového snímače maximální nejistota měření způsobená nelinearitou charakteristiky $(\Delta t)_{max} = 0{,}38\ °\mathrm{C}$ a obvykle ji lze pro uvedený rozsah teplot zanedbat [5].

U niklového odporového snímače je hodnota $(\Delta t)_{max}$ mnohem vyšší a zanedbat ji proto při jistých požadavcích na přesnost měření teploty nelze.

3.3 Vybrané průmyslové snímače pro optimalizaci

Než se začnu věnovat přímo optimalizaci a vybraným optimalizačním kritériím, je nutné definovat konkrétní průmyslové snímače, které jsou předmětem volby.

S přihlédnutím k tomu, že vybírám takový snímač, který bude měřit teplotu média (vody) uvnitř zásobníku, případně potrubí, zúžil se výběr na stonkové snímače s hlavicí a jímkou, které dnes běžně vyrábí mnoho společností zaměřených na měřicí a regulační techniku. Tyto snímače jsou totiž pro řešenou aplikaci jednoznačně nejpraktičtější a dovedou měřit přímo teplotu média s vysokou přesností.

Výčet snímačů pokrývá většinu jednotlivých typů, které se pro průmyslová měření teploty v praxi používají nejvíce, ať už z hlediska použitého teplotního čidla nebo výstupu snímače. Jelikož zmíněné snímače vyrábí značné množství společností, přičemž jejich parametry jsou téměř identické, zaměřil jsem se pouze na sortiment společnosti ZPA Ekoreg, s.r.o., Ústí n. L., jejíž výrobky jsou v současné době ve VS POS 7 použity.

Jednotlivé vybrané typy snímačů a jejich parametry jsou zobrazeny v tabulkách 3.2.1 až 3.2.3 (údaje zjištěny z katalogových listů společnosti ZPA Ekoreg, s.r.o., Ústí n. L.) [7].

Tabulka 3.2.1 - Parametry vybraných průmyslových snímačů

Typ snímače:	**ZPA STSs Pt**	**ZPA STSs/I Pt**
Typ teplotního čidla:	Pt 100	Pt 100
Měřicí rozsah:	(−40 až +200) °C	(0 až +200) °C
Přesnost měření:	Třída přesnosti B (IEC-751) $\Delta t = \pm (0{,}3 + 0{,}005 \cdot \lvert t \rvert)$ (°C)	1 % z měřicího rozsahu
Teplotní koeficient:	$\alpha = 3850 \cdot 10^{6}\ K^{-1}$	neuvedeno
Časová odezva[1]:	$\tau = 25$ s	$\tau = 25$ s
Konstrukční provedení:	snímač stonkový, montáž do jímky, hlavice (polyamid)	snímač stonkový, montáž do jímky, hlavice (polyamid)
Výstup snímače:	odporový výstup, 3vodičové zapojení	proudový převodník s výstupem (4 ÷ 20) mA, pasivní, unipolární
Stupeň krytí:	IP 65 dle ČSN EN 60 529	IP 65 dle ČSN EN 60 529
Koncová cena[2]:	860 Kč	1.350 Kč

Tabulka 3.2.2 - Parametry vybraných průmyslových snímačů

Typ snímače:	**ZPA 02050 Pt**	**ZPA 02050/I Pt**
Typ teplotního čidla:	Pt 100	Pt 100
Měřicí rozsah:	(−40 až +180) °C	(−40 až +180) °C
Přesnost měření:	Třída přesnosti A (IEC-751) $\Delta t = \pm (0{,}15 + 0{,}002 \cdot \lvert t \rvert)$ (°C)	0,6 % z měřicího rozsahu
Teplotní koeficient:	neuvedeno	neuvedeno
Časová odezva:	$\tau = 15$ s	$\tau = 15$ s
Konstrukční provedení:	snímač stonkový, montáž do jímky, hlavice (hliník)	snímač stonkový, montáž do jímky, hlavice (hliník)
Výstup snímače:	odporový výstup, 4vodičové zapojení	proudový převodník s výstupem (4 ÷ 20) mA, pasivní, bipolární
Stupeň krytí:	IP 54 dle ČSN EN 60 529	IP 54 dle ČSN EN 60 529
Koncová cena:	1.250 Kč	1.940 Kč

[1] Hodnota je stanovena pro použití snímače s jímkou a vodu jako měřeným médiem (platí shodně i pro tabulky 3.2.2 a 3.2.3).

[2] Koncová cena dána výrobcem ZPA Ekoreg, s.r.o., Ústí n. L., ke dni 30.6.2009. Součástí této ceny není jímka, kterou je nutné pro danou praktickou aplikaci dokoupit jako příslušenství (platí shodně i pro tabulky 3.2.2 a 3.2.3).

Tabulka 3.2.3 - Parametry vybraných průmyslových snímačů

Typ snímače:	**ZPA STSs Ni**	**Ilustrační foto:**
Typ teplotního čidla:	Ni 1000	
Měřící rozsah:	(−30 až +150) °C	
Přesnost měření:	přesnost dle DIN 43760 $\Delta t = \pm (0{,}4 + 0{,}007 \cdot \lvert t \rvert)$ (°C)	
Teplotní koeficient:	$\alpha = 6180 \cdot 10^{6}\ K^{-1}$	
Časová odezva:	$\tau = 25$ s	*Snímač typu STSs*
Konstrukční provedení:	snímač stonkový, montáž do jímky, hlavice (polyamid)	
Výstup snímače:	odporový výstup, dvouvodičové zapojení	
Stupeň krytí:	IP 65 dle ČSN EN 60 529	
Koncová cena:	910 Kč	*Snímač typu 02050*

Z tabulek 3.2.1 až 3.2.3 je patrné, že všechny zvolené snímače jsou použitelné pro danou konkrétní aplikaci, ať již z hlediska měřicího rozsahu, konstrukčního provedení či možnostech zapojení snímače k řídicímu systému (viz podkapitola 5.1). Ostatní parametry jsou již předmětem optimalizace v následující kapitole.

Kapitola 4

4 Optimalizace

Optimalizací se v praxi rozumí takové řešení konkrétního problému, které je v daném případě „nejlepší“.

Při optimalizaci řešení nějakého problému se konstruují optimalizační úlohy nebo také hodnotící hlediska či kritéria, která popisují řešený problém. K dané optimalizační úloze se následně přiřazují kriteriální funkce, které stanoví konkrétní způsob řešení uvažovaného problému. Vyřešení těchto funkcí v souvislosti s optimalizačními úlohami vede k požadovanému „nejlepšímu“ řešení.

4.1 Stanovení optimalizačních úloh

Jak již bylo předesláno v úvodu této práce, výsledkem optimalizace má být nalezení optimálního snímače teploty z nabídky dle podkapitoly 3.3 pro řízení ohřevu TV ve VS POS 7.

Stanovení optimalizačních úloh jsem se rozhodl směrovat do dvou zásadních oblastí, a to ekonomiky a technologie. K tomuto rozhodnutí mě vedly zejména skutečnosti, že oblast ekonomiky je v dnešní době často diskutované téma a že v teorii řízení je optimalizace velmi rozšířená a dosti podstatná záležitost.

Kritériem z oblasti ekonomiky, které přímo vede k volbě senzoru z předem dané nabídky, je **pořizovací cena snímače**, což často bývá jeden ze zásadních výběrových faktorů.

V technické oblasti je při měření teploty pomocí snímače jednou z jeho nejdůležitějších vlastností, vedle např. rychlosti odezvy, přesnost a správnost měření, a to zejména v souvislosti s řízením. Požadavky řízení a regulace na celkovou přesnost, rychlost a efektivitu mají hlavní prioritu a snímač teploty jako vstupní prvek dokáže tyto

faktory zásadně ovlivnit. Na tomto základě jsem stanovil optimalizační úlohy **časová odezva snímače** a **nejistota snímače**.

4.2 Stanovení kriteriálních funkcí

Kriteriální funkce popisují konkrétní způsob řešení optimalizačních úloh. V případě, že je optimalizační úloha formulována pomocí nějaké matematické funkce, lze pak tuto úlohu řešit analyticky. Velice častým případem kriteriálních funkcí pro analytická řešení jsou funkce MAX nebo MIN vedoucí na maximum, respektive minimum jim přiřazené optimalizační úlohy.

4.2.1 Optimalizační úloha na minimum

Všem optimalizačním úlohám, které jsem stanovil v podkapitole 4.1, lze přiřadit jednotnou kriteriální funkci MIN. Optimalizační úloze, které je přiřazena kriteriální funkce MIN, se pak nazve **optimalizační úloha na minimum**.

Obecná definice optimalizační úlohy na minimum [6]:

Je dána obecná funkce $f: X \rightarrow \boldsymbol{R}^1$ a podmnožina V, která je podmnožinou X.

Úlohou na minimum vzhledem k dané množině V pro funkci f lze formulovat takto:

Hledá se číslo $\hat{f} = \inf_{\mathbf{x} \in \mathrm{V}} f(\boldsymbol{x})$ a prvek $\widehat{\boldsymbol{x}} \in V$ takový, že $\hat{f} = f(\widehat{\boldsymbol{x}})$.

Potom musí platit:

$$f(\widehat{\boldsymbol{x}}) \leq f(\boldsymbol{x}) \text{ pro } \forall \boldsymbol{x} \in V \tag{4.1}$$

Úloha na minimum se pak zapisuje jako:

$$\min\{f(\boldsymbol{x}) | \boldsymbol{x} \in V\} \tag{4.2}$$

Z této definice plyne, že pokud existuje nějaká funkce $f(\boldsymbol{x})$, je možné na jejím určitém intervalu V najít takovou funkční hodnotu $f(\widehat{\boldsymbol{x}})$, že pro všechny ostatní funkční hodnoty $f(\boldsymbol{x})$ na daném intervalu platí vztah $f(\widehat{\boldsymbol{x}}) \leq f(\boldsymbol{x})$. Nutno zdůraznit, že tato definice platí pouze v případě, že funkce $f(\boldsymbol{x})$ je na daném intervalu spojitá.

Volba snímače z konečného počtu možností ale představuje diskrétní rozdělení a ne spojitou funkci, takže nelze pro tento případ použít optimalizační úlohu na minimum dle obecné definice výše. Z toho důvodu je nutné formulovat optimalizační úlohu na minimum jako výběr minimální hodnoty z diskrétní množiny.

Vztah 4.2 tedy upravím na

$$\min\{M\}, \tag{4.3}$$

kde M je pěti-prvková diskrétní množina obsahující výsledné číselné vyjádření jednotlivých optimalizačních úloh, stanovených v podkapitole 4.1, pro jednotlivé snímače.

4.3 Optimalizační úloha č. 1 – pořizovací cena snímače

Pořizovací ceny jednotlivých snímačů lze vyčíst z tabulek 3.2.1, 3.2.2 a 3.2.3. Jejich doplněním do rovnice 4.3 dostávám:

$$c_{MIN} = \min\{860; 910;\ 1\,250; 1\,350; 1940\}\ \text{Kč} \tag{4.4}$$

Řešením rovnice 4.4 pak je

$$\boldsymbol{c_{MIN} = 860}\ \textbf{Kč}, \tag{4.5}$$

což je již výsledná minimální pořizovací cena snímače dle optimalizační úlohy na minimum, které odpovídá snímač ZPA STSs Pt.

Optimálním snímačem dle optimalizační úlohy „**minimální pořizovací cena snímače**“ je snímač teploty s typovým označením **ZPA STSs Pt**.

4.4 Optimalizační úloha č. 2 – časová odezva snímače

Dobu odezvy jednotlivých snímačů opět vyčtu z tabulek 3.2.1, 3.2.2 a 3.2.3, jejich hodnoty doplním do rovnice 4.3 a dostanu:

$$\tau_{MIN} = \min\{15; 15; 25; 25; 25\}\ \text{s} \tag{4.6}$$

Řešením rovnice 4.6 pak je

$$\boldsymbol{\tau_{MIN} = 15\ \mathrm{s}}, \tag{4.7}$$

což je již výsledná minimální časová odezva snímače dle optimalizační úlohy na minimum, které odpovídají snímače ZPA 02050 Pt a ZPA 02050/I Pt.

Optimálním snímačem dle optimalizační úlohy „**minimální časová odezva snímače**“ jsou snímače teploty s typovým označením **ZPA 02050 Pt** a **ZPA 02050/I Pt**.

4.5 Optimalizační úloha č. 3 – nejistota snímače

Nejistota snímače patří mezi nejzákladnější a zároveň nejpoužívanější zdroje výsledné standardní nejistoty měření typu B. Nejpodstatnější složkou nejistoty snímače je jeho třída přesnosti, dále může zahrnovat např. nelinearitu statické charakteristiky. Třída přesnosti snímače je stanovena jeho výrobcem a vždy specifikuje tzv. mezní hodnotu nejistoty měření dané veličiny [5].

V rámci optimalizační úlohy tedy stanovím nejistoty jednotlivých snímačů na základě jejich přesnosti udávané výrobcem. Tak bude pro každý snímač z nabídky stanovena mezní hodnota jeho nejistoty určující standardní nejistotu typu B pro měření teploty v konkrétní aplikaci. Jediným uvažovaným zdrojem nejistoty je tedy v tomto případě třída přesnosti (přesnost) snímače.

Mezní hodnotu nejistoty snímače[3] lze vyjádřit v následujícím tvaru [5]:

$$u_B(y) = \frac{\delta_s(x_{max} - x_{min})}{\sqrt{3}}\ (°\mathrm{C}) \tag{4.8}$$

δ_s $(-)$ je relativní chyba snímače (viz rovnice 3.3)

[3] Mezní nejistota snímače stanovuje rozptyl hodnot nejistoty na maximální možný, což je v případě této optimalizační úlohy žádoucí. Dále v textu je již označována jako „nejistota snímače“.

Dosazením rovnice 3.3 do rovnice 4.8 a po vykrácení měřicího rozsahu dostávám nový tvar rovnice pro výpočet nejistoty snímače:

$$u_B(y) = \frac{(\Delta x)_{max}}{\sqrt{3}} \ (°\mathrm{C}) \tag{4.9}$$

$(\Delta x)_{max}$ (°C) je nejvyšší absolutní chyba měření teploty

Nejistoty jednotlivých snímačů bude nutné určit pro každý snímač v nabídce zvlášť, a to jak pro jeho případné využití k měření teploty primární vody, tak i teploty TV v zásobníku, jelikož snímané hodnoty teploty mají odlišný rozsah.

4.5.1 Příklad výpočtu nejistoty snímače pro měření teploty PV

Rozsah měřené teploty primární vody stanovím v intervalu

$t_{PV} = \langle 50; 90 \rangle$ (°C)

za předpokladu, že ohřev nebude nikdy tak dlouho vypnut, aby teplota primární vody klesla pod 50 °C, a zároveň počítám s možností měření překmitu výstupu ze soustavy až o 10 °C.

<u>Příklad výpočtu nejistoty snímače ZPA STSs Pt (odporový výstup):</u>

Nejvyšší absolutní chyba měření je dána výrobcem stanovenou třídou přesnosti snímače, kterou pro zmíněný snímač vyčtu z tabulky 3.2.1, tedy:

$$(\Delta x)_{max} = \pm(0{,}30 + 0{,}005 \cdot |t_{PV}|) \ (°\mathrm{C}) \tag{4.10}$$

t_{PV} (°C) je v tomto případě maximální hodnota z rozsahu měření teploty PV

Po dosazení lze již stanovit konkrétní číselnou hodnotu nejvyšší absolutní chyby snímače

$$(\Delta x)_{max} = \pm(0{,}30 + 0{,}005 \cdot 90) = \pm 0{,}75 \ °\mathrm{C} \tag{4.11}$$

a dosazením rovnice 4.11 do rovnice 4.9 lze vyjádřit již nejistotu snímače ZPA STSs Pt pro měřicí rozsah $t = \langle 50; 90 \rangle$ (°C) pro měření teploty primární vody:

$$\boldsymbol{u_B(y) = \pm 0,43\ °C} \tag{4.12}$$

Příklad výpočtu nejistoty snímače ZPA STSs/I Pt (proudový výstup):

V tomto případě je absolutní chyba měření udána výrobcem ve formě % FS. Hodnotu opět vyčtu z tabulky 3.2.1. Lze psát:

$$(\Delta x)_{max} = \pm\left(\%\,FS \cdot \frac{x_{max} - x_{min}}{100}\right) = \pm\left(\frac{90-50}{100}\right) = \pm 0{,}4\ °C \tag{4.13}$$

Dosazením rovnice 4.13 do rovnice 4.9 vyjádřím nejistotu snímače ZPA STSs/I Pt pro měřicí rozsah $t = \langle 50; 90 \rangle$ $(°C)$ pro měření teploty primární vody:

$$\boldsymbol{u_B(y) = \pm 0,23\ °C} \tag{4.14}$$

4.5.2 Příklad výpočtu nejistoty snímače pro měření teploty TV v zásobníku

Rozsah měřené teploty TV akumulované v zásobníku stanovím v intervalu

$t_{TV} = \langle 45\ ;\ 65 \rangle$ $(°C)$

na základě toho, že teplota TV je regulována v rozmezí (50–60)°C a určením mezí tohoto intervalu s jistou rezervou pro případ nesprávné regulace teploty.

Jelikož je postup výpočtu nejistot snímačů shodný jako v podkapitole 4.5.1, nebudu ho zde znovu uvádět.

4.5.3 Řešení optimalizační úlohy na minimum

K vyřešení zadané optimalizační úlohy je nejprve nutné stanovit nejistoty všech vybraných snímačů dle postupu uvedeného v kapitolách 4.5.1 a 4.5.2. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tabulce 4.1.

Tabulka 4.1 - Číselné hodnoty nejistot jednotlivých snímačů[4]

Typ snímače:	ZPA STSs Pt	ZPA STSs/I Pt	ZPA STSs Ni	ZPA 02050 Pt	ZPA 02050/I Pt
$u_B(y)_{PV}$ (°C)	±0,43	±0,23	±0,59	±0,19	±0,14
$u_B(y)_{TV}$ (°C)	±0,36	±0,12	±0,49	±0,16	±0,07

Po dosazení hodnot z tabulky 4.1 do rovnice 4.3 dostávám:

$$[u_B(y)]_{\mathrm{MIN,PV}} = \min\{0{,}43; 0{,}23; 0{,}59; 0{,}19; 0{,}14\}\ ^\circ\mathrm{C} \tag{4.15}$$

$$[u_B(y)]_{\mathrm{MIN,TV}} = \min\{0{,}36; 0{,}12; 0{,}49; 0{,}16; 0{,}07\}\ ^\circ\mathrm{C} \tag{4.16}$$

Řešením rovnic 4.15 a 4.16 pak je

$$[\boldsymbol{u_B(y)}]_{\mathbf{MIN,PV}} = \pm\mathbf{0,14}\ ^\circ\mathbf{C}, \tag{4.17}$$

$$[\boldsymbol{u_B(y)}]_{\mathbf{MIN,TV}} = \pm\mathbf{0,07}\ ^\circ\mathbf{C}, \tag{4.18}$$

což jsou již výsledné minimální nejistoty snímače dle optimalizační úlohy na minimum, kterým odpovídá snímač ZPA 02050/I, a to pro oba dva uvedené případy měření teploty.

Optimálním snímačem dle optimalizační úlohy „**minimální nejistota snímače**“ je snímač teploty s typovým označením **ZPA 02050/I Pt**.

Závěrem této podkapitoly je nutné říci, že vzhledem k výsledkům uvedených v tabulce 4.1 není nutné uvažovat v optimalizaci snímače nelinearitu statické charakteristiky jako další zdroj nejistoty snímače. Odůvodněním může být skutečnost, že dle obrázku 3.1 mají niklové odporové snímače statickou charakteristiku mnohem více nelineární než snímače platinové a jediný snímač v nabídce s niklovým čidlem měl ve srovnání s ostatními platinovými mnohem vyšší hodnotu $u_B(y)$.

[4] Dolní indexy v „PV“ a „TV“ uvedené u symbolu nejistoty snímače značí výpočet hodnoty pro měření teploty primární vody, respektive teplé vody.

4.6 Výsledné vícekriteriální hodnocení

Prozatím byly optimální snímače stanovovány jen v rámci jednotlivých optimalizačních úloh, což ale není cílem této práce, jelikož výsledným požadovaným řešením má být v ideálním případě jediný snímač teploty. Taková úloha je již předmětem vícekriteriálního rozhodování, o čemž pojednává tato podkapitola.

Charakterem lze všechny řešené optimalizační úlohy zařadit mezi **kvalitativní kritéria**, jelikož lze o výsledných hodnotách v rámci jednotlivých optimalizačních úloh říci, které jsou menší či větší než ty ostatní. Toho jsme využili např. i u sestavení úlohy na minimum.

4.6.1 Stanovení vah jednotlivých optimalizačních úloh

Aby bylo možné provést vícekriteriální hodnocení celkově řešené úlohy, tedy volby optimálního snímače dle jednotlivých optimalizačních úloh, je nutné jim přiřadit tzv. váhy. Váha kritéria vyjadřuje jeho relativní důležitost pro hodnotitele a určuje, jakou mírou se daná optimalizační úloha promítne do celkového hodnocení [11].

Metod pro stanovení vah kritérií je mnoho, já jsem se rozhodl využít **Metfesselovy alokace** [11], jejíž princip je jednoduchý a pro menší počet optimalizačních úloh zcela postačuje.

Princip metody spočívá v tom, že hodnotitel rozdělí mezi jednotlivé optimalizační úlohy 100 bodů v souladu se svými představami o jejich důležitosti a následně provede výpočet váhy jednotlivých kritérií dle rovnice 4.19 [11].

$$v_k = \frac{b_k}{100}\ (-) \tag{4.19}$$

b_k je počet bodů přiřazených *k*-té optimalizační úloze

v_k je váha *k*-té optimalizační úlohy

Bodové hodnocení jednotlivých optimalizačních úloh jsem stanovil s přihlédnutím k tomu, že technická kritéria považuji za důležitější a že pořizovací cena snímače se projeví jen při počáteční investici, zatímco další dvě úlohy se projevují neustále při běhu VS POS 7. Ohodnocení vah jednotlivých optimalizačních úloh je uvedeno v tabulce 4.4.

Tabulka 4.2 – Stanovené váhy jednotlivých optimalizačních úloh

Optimalizační úloha:	$k = 1$ **Pořizovací cena**	$k = 2$ **Časová odezva**	$k = 3$ **Nejistota snímače**
v_k	0,2	0,3	0,5

Ohodnocení vah jednotlivých úloh jsem provedl s ohledem na jejich normování, pro které musí platit [11]:

$$\sum_{k=1}^{m} v_k = 1; \quad v_k \geq 0 \tag{4.20}$$

m je celkový počet optimalizačních úloh

4.6.2 Vyhodnocení vícekriteriální úlohy

Pro konečné vyhodnocení dané vícektiteriální úlohy, vedoucí k nalezení optimálního snímače k řízení výše popisovaného procesu dle zvolených optimalizačních úloh, jsem se rozhodl zvolit **metodu váženého součtu pořadí** [11], která vyniká svou jednoduchostí a k řešení vícekriteriální úlohy postavené na kvalitativních kritériích je velice vhodná.

Princip této metody je následující [11]:

1. Hodnoty jednotlivých optimalizačních úloh se převedou na pořadové funkce dle vzájemného pořadí hodnot s využitím matematických operátorů $<$ a $>$.
2. Obecné řešení dané vícekriteriální úlohy je dáno vztahem:

$$s = \sum_{k=1}^{m} v_k \cdot q_{i,k} \tag{4.21}$$

   m je celkový počet optimalizačních úloh

   $q_{i,k}$ je hodnota pořadové funkce *i*-té varianty dle *k*-té optimalizační úlohy

3. Optimální řešení této úlohy pak popisuje vztah:

$$s_{OPT} = \min_{\mathrm{i}} \sum_{k=1}^{m} v_k \cdot q_{i,k} \tag{4.22}$$

Hodnoty pořadových funkcí jednotlivých variant v souvislosti s danou optimalizační úlohou uvádí tabulka 4.3.

Tabulka 4.3 - Hodnoty pořadových funkcí $q_{i,k}$ pro jednotlivé varianty a optimalizační úlohy[5]

Typ snímače (i-tá varianta):	**ZPA STSs Pt** $(i = 1)$	**ZPA STSs/I Pt** $(i = 2)$	**ZPA STSs Ni** $(i = 3)$	**ZPA 02050 Pt** $i = 4)$	**ZPA 02050/I Pt** $(i = 5)$
$(k = 1)$ ***Pořizovací cena***	1	3	2	4	5
$(k = 2)$ ***Časová odezva***	4	4	4	1,5	1,5
$(k = 3)$ ***Nejistota snímače***	4	2,5	5	2,5	1

Pro závěrečné vyhodnocení vícekriteriální úlohy jsem využil vztahu 4.21 s dosazením hodnot z tabulek 4.2 a 4.3. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tabulce 4.4.

Optimálním řešením zadané optimalizační úlohy je pak řešení rovnice 4.22

$$\boldsymbol{s_{OPT} = 1,95}, \tag{4.23}$$

čemuž odpovídá snímač s označením ZPA 02050/I Pt.

Na základě rovnice 4.23 a tabulky 4.4 můžu říci, že optimálním snímačem pro řízení ohřevu TV ve VS POS 7 je na základě optimalizačních úloh stanovených v podkapitolách 4.3 až 4.5 a jim přiřazeným vahám snímač s označením **ZPA 02050/I Pt**.

Tabulka 4.4 - Obecná řešení vícekriteriální úlohy na nalezení optimálního snímače

Typ snímače:	**ZPA STSs Pt**	**ZPA STSs/I Pt**	**ZPA STSs Ni**	**ZPA 02050 Pt**	**ZPA 02050/I Pt**
s	3,40	3,05	4,1	2,5	1,95

[5] V případě rovnocenného hodnocení některých variant v rámci jedné optimalizační úlohy, např. shodná časová odezva pro $k = 2$ se pořadová funkce ohodnotí průměrnou hodnotou [10].

Kapitola 5

5 Řídicí systém

Řídicí systém s nastavitelným regulátorem patří mezi základní prvky většiny řízených soustav v technické praxi.

5.1 Popis řídicího systému

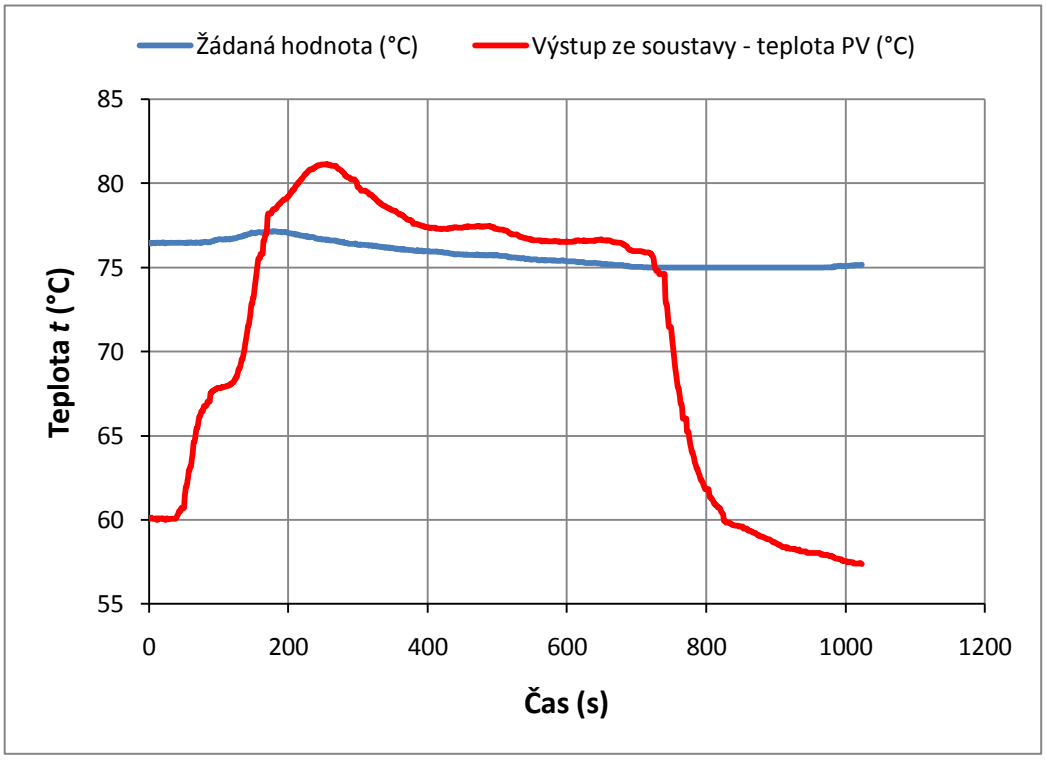
Řídicím systémem použitým k řízení procesu ohřevu TV v době vzniku této práce byl výrobek společnosti REM-Technik, s.r.o. VIPA systém 300S. Jedná se o kompaktní vysokorychlostní řídicí systém s mikroprocesorem, kompatibilní se systémy Siemens STEP7 a mnoha volitelnými vstupními a výstupními moduly.

Snímače pro snímání teplot TV v zásobníku a primární vody jsou připojeny přes modul s analogovými vstupy s označením AI 331-7KF01, který umožňuje připojit až osm vstupních zařízení s napěťovými, proudovými i odporovými výstupy, a to ve 2vodičovém, 3vodičovém i 4vodičovém zapojení. Typy snímačů, které byly předmětem volby, jsem tedy zvolil tak, aby je bylo možné bezproblémově připojit ke stávajícímu vstupnímu modulu řídicího systému, což považuji za velice důležité.

5.2 Stávající regulátor ohřevu teplé vody

Jak již bylo částečně popsáno v podkapitole 2.2, ohřev primární vody je řízen PI regulátorem, a to nespojitě dvoupolohově. Současný regulátor má parametry regulace nastaveny na základě předchozích zkušeností s regulováním podobných soustav na $k_P = 2$ a $T_I = 40$, ne na základě identifikace systému, což je v rámci nízkých požadavků na přesnost sice dostačující, ale rozhodně ne ideální.

Na obrázku 5.1 je zobrazena naměřená přechodová charakteristika uzavřené zpětnovazební smyčky. Ta popisuje jeden cyklus ohřevu TV v zásobníku od okamžiku sepnutí regulátoru v čase 0 s do jeho vypnutí v čase 710 s, kdy žádaná veličina dosáhla hodnoty 75 °C v závislosti na teplotě TV v zásobníku dle obrázku 2.2. Dále již dochází k samovolnému ochlazování primární vody.



Obrázek 5.1 - Přechodová charakteristika uzavřené zpětnovazební smyčky s PI regulátorem

Z přechodové charakteristiky na obrázku 5.1 je patrné, že současné parametry regulátoru nejsou nastaveny pro danou regulaci zcela správně, jelikož regulátor reguluje s ustálenou regulační odchylkou cca 10 %.

5.3 Identifikace soustavy a návrh parametrů regulátoru

Identifikace regulované soustavy a získání jejího popisu ve formě přenosu nebo přechodové charakteristiky otevřené regulační smyčky patří k základnímu předpokladu pro návrh parametrů regulátoru.

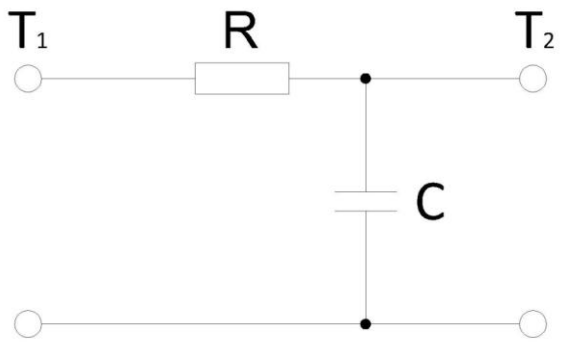
Identifikace tepelných systémů bývá v praxi často složitá, jelikož se jedná o systémy s rozprostřenými parametry, což znamená, že jeho veličiny závisí i na vlastním rozložení v prostoru. Pro matematicko-fyzikální popis takových systémů je pak nutné použít parciální diferenciální rovnice obsahující derivace nejen časových, ale i prostorových souřadnic. Zjednodušenou formou popisu tepelného systému může být jeho zjednodušení a nahrazení systémem se soustředěnými parametry, což může být pro regulaci jednoduchých tepelných procesů dostačující. Jinou, experimentální možností získání přenosu systému, je aproximace přechodové charakteristiky.

Popis procesu ohřevu teplé vody ve VS POS 7 je značné komplikovaný, jelikož vzhledem k tomu, že v současném stavu musí být systém nepřetržitě spuštěn, není možné rozpojit zpětnovazební smyčku a naměřit přechodovou charakteristiku systému.

5.3.1 Zjednodušený popis systému

Vzhledem ke skutečnostem popsaných v podkapitole 5.3 jsem se rozhodl uvést pouze velmi zjednodušený popis proces ohřevu TV, a to ve formě popisu systému se soustředěnými parametry.

Tepelné systémy mají tradiční analogii v elektrických systémech, kdy elektrické napětí u je analogické teplotě T a elektrický proud i tepelnému toku Φ [3]. Tepelné systémy se pak často modelují pomocí RC článků s tepelnými kapacitami jednotlivých částí tepelného systému a tepelnými rezistory, kterými prochází tepelný výkon, jak je vyobrazeno na obrázku 5.2.



Obrázek 5.2 - RC článek jako ekvivalentní elektrické schéma tepelného systému

Pro hodnoty tepelného výkonu[6] procházejícího tepelným odporem a teplotu T_2 na tepelné kapacitě dle obrázku 5.2 platí následující vztahy:

$$\Phi = \frac{1}{R}(T_1 - T_2)\ (\mathrm{W}) \tag{5.1}$$

$$\mathrm{T_2} = \mathrm{T_0} + \frac{1}{\mathrm{C}}\int_{\mathrm{t_0}}^{\mathrm{t}} \Phi(\tau)\mathrm{d}\tau \tag{5.2}$$

Φ (W) je tepelný tok

R (W^{-1} K) je tepelný odpor

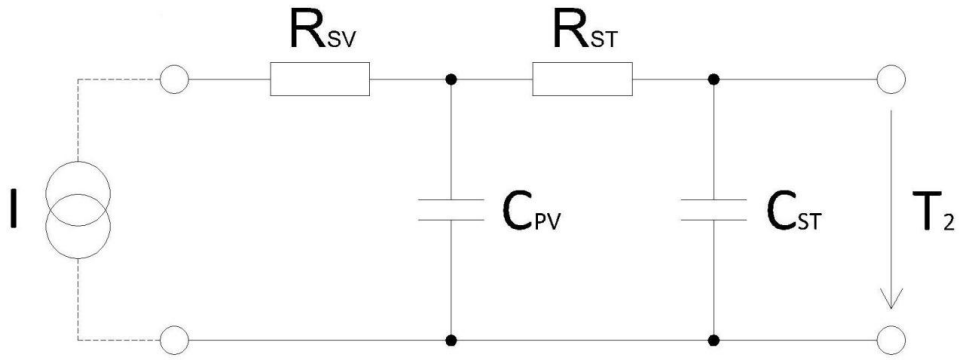
T_1 (K) je teplota na tepelném odporu

T_2 (K) je teplota na tepelné kapacitě

T_0 (K) je počáteční teplota na tepelné kapacitě

C ($\mathrm{J\ K}^{-1}$) je tepelná kapacita

Na obrázku 5.3 je ekvivalentní elektrické schéma zjednodušeného modelu ohřevu TV ve VS POS 7. Model je navržen tak, že nezohledňuje žádanou hodnotu v závislosti na teplotě TV v zásobníku dle obrázku 2.2, která by se projevila na vstupu systému jako chybová veličina. Dále předpokládám dokonalou izolaci výměníků a potrubí, takže zanedbávám teplotu okolního prostředí. Vstupem systému je tepelný výkon dodávaný z primárního okruhu spirálového výměníku, který ohřívá primární vodu. Výstupem systému je měřená teplota primární vody.



Obrázek 5.3 - Ekvivalentní elektrické schéma zjednodušeného modelu procesu ohřevu TV

[6] Význam tepelného výkonu má zde přímo tepelný tok Φ (W).

Popis veličin v obrázku 5.3:

I je zdroj proudu jako ekvivalent zdroje tepelného výkonu, primárního okruhu spirálového výměníku

R_{SV} je tepelný odpor na teplosměnných plochách spirálového výměníku

R_{ST} je tepelný odpor teplotního čidla

C_{PV} je tepelná kapacita primární vody

C_{ST} je tepelná kapacita teplotního čidla

T_2 představuje výstup systému jako měřenou teplotu primární vody

Schéma uvedené na obrázku 5.3 zobrazuje skutečně velice zjednodušený model, který by vzhledem ke složitosti regulovaného procesu nebyl dostačující. Na druhou stranu detailnější popis regulovaného procesu by značně přesáhl rozsah této práce. Popis složitých tepelných systémů, který je ovlivňován mnoha faktory, např. několik teplot měřených v různých místech procesu, vliv teploty okolního prostředí, tepelné ztráty, apod. je náročným úkolem při návrhu regulátorů, zejména v případě vyšších požadavků na přesnost.

Na základě uvedených skutečností docházím k závěru, že mnohem lepší variantou popisu procesu ohřevu TV ve výměníkové stanici VS POS 7 je naměřená přechodová charakteristika otevřené smyčky, kterou nebylo bohužel možné kvůli nutnosti trvalého běhu stanice naměřit. Aproximací této přechodové charakteristiky by bylo možné získat dostatečně přesnou formu přenosu řízeného systému, ze kterého je dále možné určit parametry regulátoru, případně použít empirické metodu návrhu parametrů regulátoru, např. Ziegler-Nichols.

Kapitola 6

6 Závěr

Hlavním cílem této práce bylo stanovit optimalizační kritéria a na jejich základě zvolit optimální snímač teploty s konkrétním teplotním čidlem pro řízení ohřevu teplé vody ve výměníkové stanici POS 7. Jako optimální snímač byl zvolen odporový platinový snímač od společnosti ZPA Ekoreg, s.r.o., Ústí nad Labem s typovým označením ZPA 02050/I Pt.

Z výsledků optimalizace je patrné, že čím přesnější snímač je, tím je zpravidla vyšší jeho pořizovací cena. Na druhou stranu je vynaložení vyšších počátečních nákladů kompenzováno v případě zvoleného optimálního snímače velmi vysokou přesností měření, rychlou časovou odezvou a i mnohem lepší konstrukcí. Otázkou zůstává, zda je v případě výměníkové stanice, kde jsou požadavky na přesnou hodnotu teploty výstupní teplé vody nízké, možnost tuto přesnost využít. I přesto doporučuji nahradit stávající snímač ZPA STSs Pt optimálním snímačem za účelem vyšší přesnosti měření a rychlejší časové odezvy, a to již z důvodu, že vzhledem ke stejnému výstupu optimálního i stávajícího snímače je bez jakýchkoli problémů možno využít stávající hardware řídicího sytému.

Značná omezení v přístupu a možnostech experimentování na výměníkové stanici VS POS 7 z opodstatněných důvodů nutnosti jejího trvalého běhu vedla k tomu, že v rámci této práce nebyly stanoveny konkrétní parametry regulátoru k lepší a přesnější regulaci TV v zásobníku. Mým doporučením je využít např. jedné z pravidelných odstávek dodávky teplé vody do rozvodné sítě, naměřit přechodovou charakteristiku systému a s jejím využitím nastavit parametry regulátoru nové přímo pro daný regulovaný tepelný proces.

Tato práce mi přinesla mnoho nových poznatků v oblasti senzoriky, řízení a optimalizace, a to zejména z hlediska metod používaných v praxi. Dále jsem si také značně rozšířil své obzory v oblasti energetiky, a to převážně teplárenství a s ním spojenou problematikou, výměníky tepla a zúčastněnými tepelnými procesy.

Seznam použité literatury

[1] Šesták J., Žitný R.: *Tepelné pochody II*. Vydavatelství ČVUT, Praha, 1997

[2] Míka V.: *Základy chemického inženýrství*. SNTL, Praha, 1977

[3] Horáček P.: *Systémy a modely*. Vydavatelství ČVUT, Praha, 2000

[4] Ripka P., Ďaďo S., Kreidl M., Novák J.: *Senzory a Převodníky*. Vydavatelství ČVUT, Praha, 2005

[5] Kreidl M.: *Měření teploty – senzory a měřící obvody*. BEN, 2005

[6] Míka S.: *Optimalizace*. ZČU, Plzeň, 1996

Webové stránky:

[7] *ZPA Ekoreg, s.r.o. Ústí n. L. – měřicí a regulační technika*. [http://www.zpaul.cz], 2009

[8] *REM-Technik, s.r.o.* [http://www.rem-technik.cz/], 2009

[9] *Vytápění TZB-info – předpisy, normy, výpočty, dokumenty*. [http://vytapeni.tzb-info.cz], 2009

[10] Neužil M.: *Použití deskových výměníků na parních aplikacích a odvod kondenzátu*. [http://www.tlakinfo.cz/t.py?t=2&i=457], TLAKinfo, 2009

Ostatní:

[11] Knápek J., Šafránek J.: *Soubor přednášek z předmětu Y16OMR - Optimalizační metody a rozhodování*. ČVUT, 2007

[12] Vyhláška č. 194/2007 Sb. stanovující pravidla pro vytápění a dodávku teplé vody, 2007

[13] Normy ČSN IEC 751 a DIN 43760 specifikující požadavky na průmyslové odporové snímače teploty, 1994

[14] Sotonová J., Hřib V.: projektová dokumentace k zakázce č. ZUL08078 o rekonstrukci VS POS 7, MARTIA a.s., Ústí nad Labem, 2008

Seznam obrázků a grafů

Obrázek 2.1 - Principiální schéma výměníkové stanice POS 7 6
Obrázek 2.2 - Závislost žádané hodnoty regulátoru na teplotě TV v zásobníku 6
Obrázek 3.1 - Teplotní závislost kovových odporových senzorů 15
Obrázek 3.2 - Dovolené tolerance průmyslových Pt měřicích odporů dle IEC 751 17
Obrázek 3.3 - Dovolené tolerance průmyslových Ni měřicích odporů dle DIN 43760 18
Obrázek 5.1 - Přechodová charakteristika uzavřené zpětnovazební smyčky s regulátorem ... 34
Obrázek 5.2 - RC článek jako ekvivalentní elektrické schéma tepelného systému 35
Obrázek 5.3 - Ekvivalentní elektrické schéma zjednodušeného modelu procesu ohřevu TV ... 36
Obrázek A.1 – Grafické znázornění pořizovacích cen jednotlivých snímačů IV
Obrázek A.2 - Grafické znázornění časových odezev jednotlivých snímačů IV
Obrázek A.3 - Grafické znázornění nejistot jednotlivých snímačů V
Obrázek A.4 - Grafické znázornění obecných řešení vícekriteriální optimalizační úlohy V

Seznam tabulek

Tabulka 3.1 - Teplotní závislost základních materiálů senzorů [5] 15

Tabulka 3.2.1 - Parametry vybraných průmyslových snímačů 21

Tabulka 4.1 - Číselné hodnoty nejistot jednotlivých snímačů 29

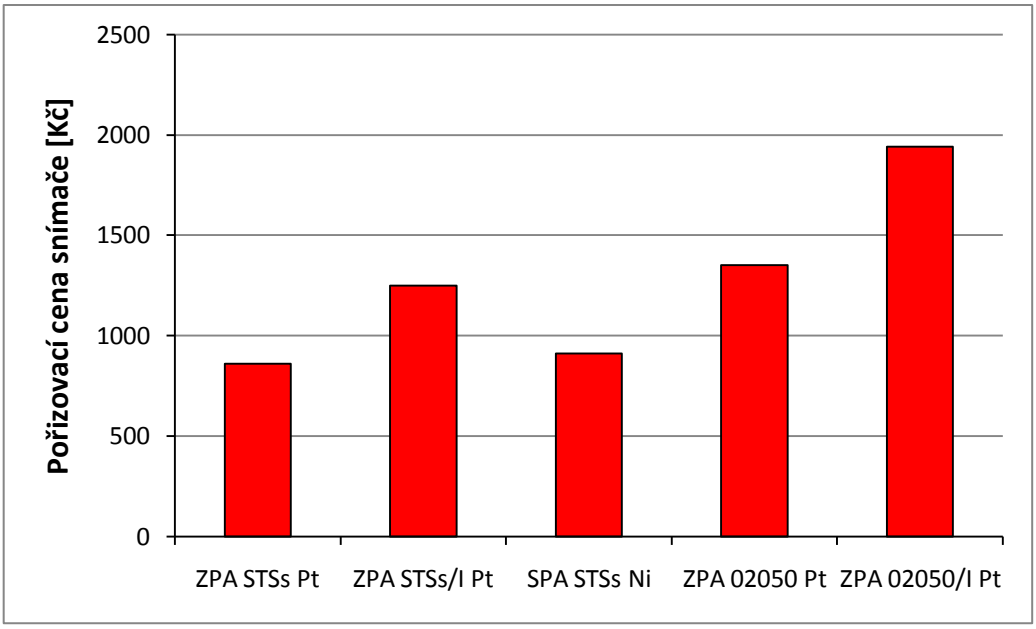
Tabulka 4.2 – Stanovené váhy jednotlivých optimalizačních úloh 31

Tabulka 4.3 - Hodnoty pořadových funkcí $q_{i,k}$ *pro jednotlivé varianty a optimalizační úlohy* 32

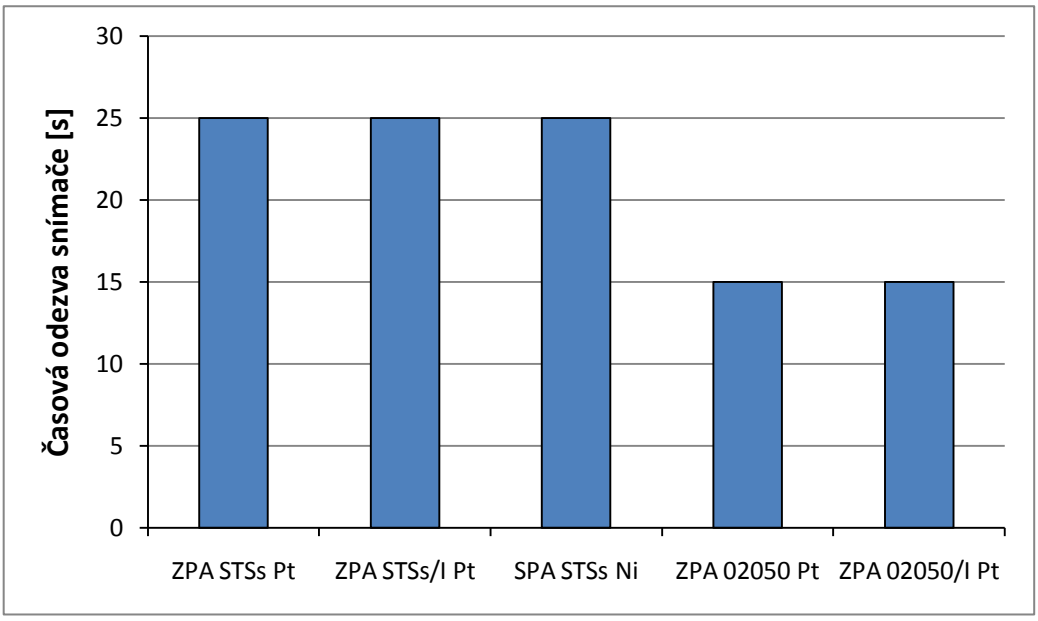
Tabulka 4.4 - Obecná řešení vícekriteriální úlohy na nalezení optimálního snímače 32

Příloha A

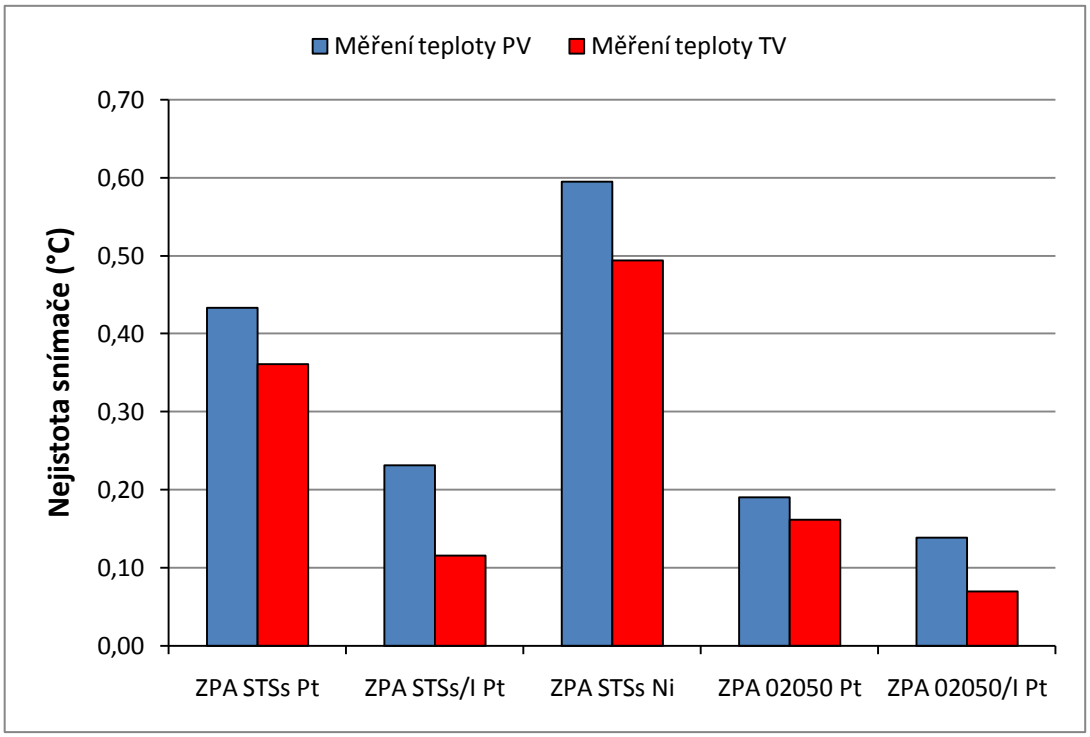
A. Nezařazené obrázky a tabulky



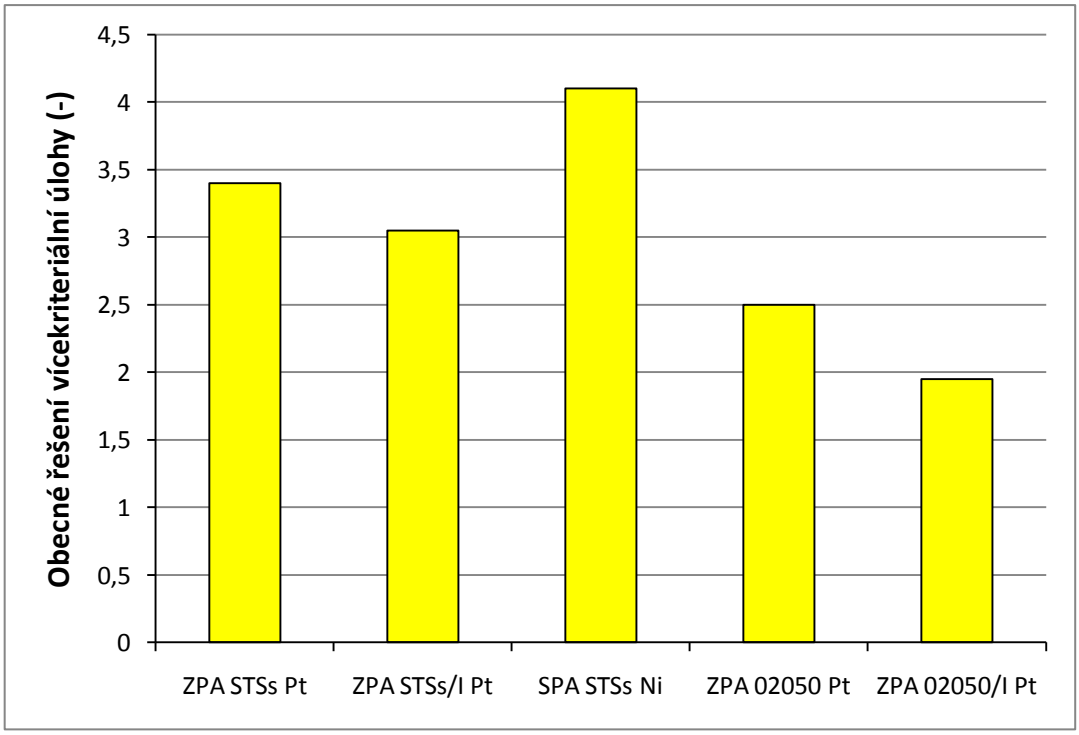
Obrázek A.1 – Grafické znázornění pořizovacích cen jednotlivých snímačů



Obrázek A.2 - Grafické znázornění časových odezev jednotlivých snímačů



Obrázek A.3 - Grafické znázornění nejistot jednotlivých snímačů



Obrázek A.4 - Grafické znázornění obecných řešení vícekriteriální optimalizační úlohy