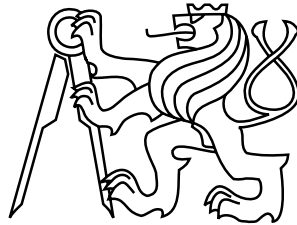


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA ŘÍDICÍ TECHNIKY



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Inteligentní regulátor pro klimatizaci

Praha, 2006

Miloš Smetana

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem zadanou diplomovou práci vypracoval samostatně s přispěním vedoucího diplomové práce a použil jsem pouze literaturu v práci uvedenou.

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

V Praze dne

podpis:

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval především vedoucímu práce Doc. Ing. Janu Bílkovi, CSc. za cenné rady při řešení této práce. Dále bych rád poděkoval svým rodičům za podporu při studiu na této škole a všem lidem dobré vůle.

Abstrakt

Práce popisuje chování budov z pohledu vytápění a regulace. Blíže se zaměřuje na regulaci topného systému rodinného domku, na kterém je prováděno měření a pro který je vytvořen matematický model v systému MATLAB–Simulink. Vytvořený model respektuje venkovní vlivy a je koncipován tak, aby jej bylo možné změnou konstant použít pro jinou obdobnou soustavu.

Abstract

This diploma thesis describes behaviour of buildings in the meaning of heating and its control. Much closer look is dedicated to controlling the heating system of a family house on which a measuring is performed and for which the mathematical model in system MATLAB–Simulink is created. The model respects the influences of weather and offers possibility to change it to fit any other similar system by only changing its constants. For this model of a family house temperature controllers, PID controller, fuzzy logic controller and a two-step controller were designed.

Obsah

1	Úvod	1
1.1	Rozdělení budov	1
2	Úvod do problematiky vytápění	4
2.1	Základy termodynamiky	7
2.2	Tepelná vodivost	8
3	Tepelná prostupnost a izolace	10
4	Měřicí senzory	12
4.1	Senzory teploty	12
4.1.1	Termoelektrické senzory teploty	12
4.1.2	Radiační pyrometry	13
4.1.3	Inteligentní senzory teploty	14
4.1.4	Termistory	14
4.1.5	Odporové senzory teploty	15
4.2	Snímač průtoku	19
4.3	Senzor pro měření spotřeby elektrické energie	19
4.4	Senzor pro měření rychlosti větru	19
4.5	Senzor slunečního svitu	20
5	Regulace	23
5.1	Spojité regulace	24
5.2	Nespojitá regulace	26
5.3	Vlečná regulace	27
6	Systémy Teco	29
6.1	Tecomat a Tecoreg	29
6.2	Mosaic	31
7	Měření na rodinném domku	33
7.1	Očekávané výsledky měření	33
7.2	Měření za normálních podmínek	35
7.3	Speciální měření	37
7.4	Vliv polohy místností	38
7.5	Měření ztrát okny a zdmi	39

8 Model	41
8.1 Matematický model prostupu tepla	41
8.2 Model chování místnosti	45
9 Návrh regulátorů	57
9.1 Fuzzy regulátor	57
9.2 PID regulátor	63
9.3 Dvoupolohový regulátor	64
9.4 Shrnutí	66
10 Závěr	67
Literatura	69
A Obsah přiloženého CD	73

Kapitola 1

Úvod

Úkolem této práce je provést měření na obydleném domě a na jeho základě vytvořit matematický model, realizovat model v systému MATLAB–Simulink, popsat v něm chování a vlivy poruch. Budu se zde zabývat diskusí jak topit a regulovat co nejlevněji a minimalizovat ztráty. To znamená, že zde srovnám regulaci vyspělejší metodou s regulací klasickou. Pohovořím o vnějších vlivech, o izolaci a různých možnostech vytápění.

Regulace teploty v budovách předpokládá alespoň částečnou znalost systému (dané budovy nebo místnosti) a znalost topného systému jako zdroje energie. Podle úrovně znalosti systému bude vypadat i kvalita regulace.

Vliv na způsob realizace regulačního systému má výkon zdroje tepelné energie. Jinak se navrhují regulační systémy pro domácí kotle o výkonu řádově 20 kW a jinak systémy vytápějící celé sídliště o výkonech v řádu megawatů. Důležité je i jaký je tlak topného média, jedná-li se o nízkotlaký systém nebo vysokotlaký. Je potřeba brát i ohled na druh akčního členu (topného tělesa).

1.1 Rozdělení budov

Chceme-li se zabývat regulací teploty nějaké budovy, je potřeba si uvědomit, o jaký druh budovy se jedná. Rozhodující vliv má nejen konstrukce budovy, ale i účel budovy. Jinak bude řešená regulace v obchodním centru a jinak ve školách. Podle účelu je tedy možné rozdělit budovy na

- obytné budovy,
- výrobní budovy,
- administrativní budovy a
- speciální budovy.

Podle konstrukce se mohou budovy dělit na lehké a těžké. Pro těžké konstrukce budov platí nižší vliv venkovní teploty a pomalejší reakce na změny. U lehkých konstrukcí bude mít venkovní teplota vyšší vliv na regulaci a regulátor bude reagovat rychleji na případné změny, protože se předpokládá horší tepelná izolace, a tedy vyšší ztráty.

Obytné budovy

Jedná se především o rodinné domky, panelové domy atd. U těchto budov se předpokládá trvalý výskyt osob. Není pravdou, že v obytných budovách je potřeba topit jenom odpoledne, kdy jdou jejich obyvatelé ze zaměstnání. Co když je někdo nemocný? Nebo děti, nemají pevnou pracovní dobu. Také se předpokládá jiná žádaná hodnota během dne a jiná v noci. Dále je potřeba vzít v potaz charakter vytápění, jedná-li se o místní vytápění, centrální nebo místní se společnou kotelnou.

Jelikož snadno může nastat případ, kdy jedné osobě je při teplotě okolí 23 °C stále zima a jiné osobě při téže okolní teplotě již nepříjemné horko, je třeba vzít ohled na to, že pocit tepla či chladu je velmi subjektivní. Významným faktorem tedy je i to, zdali jsou osoby vyskytující se v uvažovaném objektu schopny dospět k dohodě, jak moc chtějí topit.

Uvažujeme-li rodinné domky, je zde předpoklad, že jejich obyvatelé jsou schopni dohody. Obvykle tedy topí podle nejchladnější místnosti v domě.

V panelových domech, ať už s centrálním vytápěním nebo se společnou kotelnou, se předpokládá, že lidé nejsou schopni se dohodnout. Proto je stanoveno vyhláškou od kolika do kolika hodin se topí, i jak moc se topí. Společnosti zajišťující centrální vytápění proto topí podle určitých charakteristik. Jedná se o tzv. ekvitermní regulaci, o které budeme hovořit později.

Výrobní budovy

Zde lze uvažovat například různé výrobní linky, montážní haly a jiná místa, kde se vyskytují osoby, které vykonávají nějakou činnost. V těchto budovách se předpokládá určitý pohyb osob. Jedná se o práci, která není sedavého typu. V těchto prostorách bývá obvykle teplota nižší než v obytných budovách nebo i budovách administrativních. Zároveň je třeba uvažovat, pokud nejsou noční směny, že v noci není potřeba topit. Je potřeba zohlednit i vliv vnitřních zdrojů tepla. Většinou se jedná o různé stroje, motory, počítače a jiné výrobní prostředky které uvolňují teplo. Za zdroj tepla je možné uvažovat i člověka. Velikost tepla produkovaného člověkem je ale závislá na druhu činnosti, kterou daná osoba vykonává.

Administrativní budovy

V administrativních budovách bývá zpravidla přesně definovaný provoz. Je tedy znám časový interval předpokládaného výskytu osob. Implicitně se nepředpokládá výskyt osob v budově po šesté hodině večerní. Uvažuje se sedavý druh práce, tedy nižší produkce tepla od osob, a tedy i požadavek na vyšší teplotu.

Speciální budovy

Mezi speciální druh budov bych zařadil především školy, hotely, závodní i jiné jídelny, nákupní střediska, nemocnice, domovy důchodců apod.

Školy by se na první pohled mohly jevit jako budovy co se charakteru týče podobné administrativním budovám, ale není tomu tak. Ve školách je sice výskyt osob definovaný

(dle rozvrhu), ale budeme-li uvažovat například tělocvičnu, bude se charakter budovy jevit jinak. Předpokládejme, že ráno jdou cvičit nižší ročníky a je potřeba (i když se budou pohybovat), aby měly v místnosti teplo. To znamená, že je třeba začít topit s předstihem. Vyšší ročníky mají zase tělocvik odpoledne a mezi tím v místnosti nikdo není, není potřeba tedy topit, ale jako ráno opět začít s předstihem. Naproti tomu ve třídách se musí topit stále, respektive udržovat teplotu v patřičných mezích.

V hotelech je zpravidla použita regulace s ohledem na komfort zákazníka, který má možnost komfortnost měnit na základě osobní potřeby (obr. 5.7).

Jídelny, nákupní střediska, konferenční sály a kina se vyznačují nutností v zimě topit a v létě klimatizovat. Navíc je potřeba u těchto budov zajistit výměnu vzduchu. Vzhledem k tomuto požadavku se používá tzv. topení klimatizací, tedy teplým vzduchem. Při regulaci je potřeba zohlednit skutečnost, že vzduch vstupující do místnosti se ohřívá ve dvou fázích. V první fázi se předeřeje od odpadního vzduchu, tím se docílí značné energetické, tedy i ekonomické, úspory. V druhé fázi se dokončuje ohřev na žádanou hodnotu.

Kapitola 2

Úvod do problematiky vytápění

Motto: Problém vytápění je starý jako lidstvo samo. Již jeskynní člověk se musel postarat, aby v zimě nezmrzl.

Mezi nejdůležitější kritéria pro topné a regulační systémy patří ekonomická stránka. Dalším předním kritériem je ekologie, která dnes již značně ovlivňuje většinu oborů. Na základě těchto kritérií můžeme vybírat z následujících možných systémů pro topení, vybral jsem nejznámější

- kotle na pevná paliva,
- elektrické kotle,
- plynové kotle,
- přímotopy,
- tepelné čerpadlo a
- solární systémy.

Kotle na pevná paliva

Kotle na pevná paliva jsou v současné době, hlavně z ekologických důvodů, na ústupu. Dochází v nich k nedokonalému spalování, a tím i k úniku nebezpečných splodin do ovzduší. Navíc účinnosti těchto kotlů nebývají tak vysoké jak je zapotřebí. Výjimku tvoří kotle výkonů řádu megawattů na dřevěné štěpky. Zavádění těchto kotlů je dokonce podporováno evropskou unií. Jinak jsou kotle na pevná paliva (ať už se jedná o dřevo, uhlí, mazut i jiné látky) nahrazovány kotly plynovými. Další nevýhodou je nutnost obsluhy, ne vždy je možné plně automatizovat přísun paliva. Při použití v domácnostech je to téměř nemožné. Jedním z druhů kotlů na pevná paliva pro domácnosti, které se dnes ještě instalují, jsou kotle na pelety. Jedná se o piliny a hobliny slisované vysokým tlakem do podoby dřevěné brikety. Nejrozšířenější velikostí pelet je dnes průměr 6, 8 a 9 mm a délka od 5 do 25 mm. Výhřevnost pelet je zhruba stejná jako u dřevěných briket od 17 do 19 MJ/kg.

Elektrické kotle

Přímotopné teplovodní elektrokotle jsou určeny k vytápění bytů, rodinných domů, provozoven či jiných podobných objektů. Jsou spolehlivým zdrojem tepla se 100 % využitím dodané elektrické energie. Je možné je připojit do vytápěcího systému s radiátory nebo do systému podlahového a stěnového vytápění s přímým, akumulacním nebo smíšeným ohřevem. Běžně se výkony kotlů určených pro domácnosti pohybují v rozmezí 3 až 30 kW. Dosahují vysoké účinnosti a snadno se obsluhují. Jejich provoz lze plně zautomatizovat. Provoz elektrokotlů je zcela ekologický.

Topnou nebo užitkovou vodu ohřívá elektrokotel elektrickými topnými tělesy. Jednotlivá topná tělesa se spínají v časovém odstupu, aby se zabránilo nadměrnému zatížení sítě při sepnutí. Ohřátá voda z kotle cirkuluje ve vytápěcím systému pomocí oběhového čerpadla nebo samotíží. Požadovanou teplotu v kotli a jeho automatický provoz zajišťuje vestavěný termostat.

Elektrokotle umožňují blokování provozu připojeným signálem hromadného dálkového ovládání (HDO), který podle potřeby regulace v elektrické rozvodné síti vysílají energetické závody.

Provoz elektrokotle je možné řídit buď manuálně pomocí ovládacích prvků na ovládacím panelu a kotli nebo připojeným prostorovým termostatem umístěným v referenční místnosti, případně spínacím signálem z nadřazeného řídicího systému. Každý elektrokotel je pro zajištění maximální bezpečnosti provozu vybaven bezpečnostním termostatem pro ochranu elektrokotle proti přehřátí, bezpečnostním tlakovým spínačem pro ochranu elektrokotle před poškozením při úniku vody z vytápěcího systému a jisticími přístroji elektrických topných těles.

Plynové kotle

Plynové kotle lze rozdělit do několika výkonostních tříd. Kondenzační kotle dosahují díky svému unikátnímu řešení špičkových technických parametrů. Kotle pracují s lineární modulací, a to v rozsahu 20–100 % výkonu s účinností 97.5 %. Možná je i integrovaná ekvitermní regulace a digitální komunikace s regulátory (například SIEMENS ALBATROS). Některé kondenzační kotle se vyznačují zvláštností, a sice, udává se, že jejich účinnost může o málo překročit 100 % (104 %). Nejedná se o žádný zázrak, ale o technické řešení, které umožňuje získávat teplo kondenzací, odtud název kondenzační kotle. Pro byty, rodinné a činžovní domy se výkony plynových kotlů pohybují od 6.4 do 60 kW. Kotle dodávané s integrovaným nerezovým zásobníkem o objemu 50 l zajišťují vysoký komfort přípravy teplé vody. Kompaktní rozměry přitom umožňují jednoduché umístění dle požadavků. Dále jsou vyráběny kotle s průtočným ohřevem TUV nebo bez, ve výkonové řadě 23 a 28 kW. Vyrábí se modely závěsné i stacionární s atmosférickými i tlakovými hořáky, s odtahem spalin do komína i s nuceným odtahem přes zeď (TURBO), kotle na zemní plyn nebo propan. Pro hromadnou dodávku tepelné energie se vyrábí kotle vysokých výkonů řádově megawatty až desítky megawattů. Tyto kotle jsou obvykle vybaveny složitým ochranným systémem, obsahují základní bezpečnostní regulátory přímo od výrobce.

Přímotopná tělesa

Elektrické vytápění je srovnatelné s jinými topnými systémy. Životnost systému se obvykle uvažuje 10 - 15 let. Pořizovací náklady se liší podle druhu nejdlevnější: elektrické přímotopy - následují elektrické topné kabely - radiátorové trubkové systémy - teplovodní podlahové vytápění. Provozní náklady jsou dány cenou za 1 kWh energie. Tady lze snadno srovnávat, protože i cena plynu je dnes účtována v kWh. Tuto položku má elektřina vyšší, ale má 100 % účinnost, ke kotlům je třeba přičíst přírůzek na nižší účinnost. Cena elektřiny pro topení přímotopy je dodavateli elektrické energie zvýhodňována oproti běžnému odběru. Mezi hlavní výhody přímotopných těles patří ekologičnost a nízké reakční doby z hlediska regulace. Jejich nevýhodou je nulová tepelná kapacita a delší doba potřebná k počátečnímu natopení místnosti.

Tepelná čerpadla

Jak už napovídá název, jedná se o zařízení čerpající teplo. Jsou to zařízení, která slouží k získávání tepla pro vytápění z okolního prostředí (z přírody). Toto teplo je zadarmo a k jeho získání se musí přivést část jiné (obvykle elektrické) energie. Zisk tepelné energie z přírody je ale vyšší, než energie odebraná ze sítě, a proto jsou tato zařízení výhodná nejen po stránce ekonomické, ale i ekologické. Obvykle se při přivedení 1 kWh elektrické energie získají 3 až 4 kWh tepla. Tepelné čerpadlo vlastně ochlazuje venkovní prostředí a získanou energii převádí na vyšší teplotu a předává do topného systému. Venkovní teplota může být nízká, a přece je možné ze vzduchu venku odebírat teplo. Dosud jsme hovořili o tepelném čerpadlu systému voda-vzduch, tedy čerpání tepla ze vzduchu. Další možnost je čerpat teplo ze země (systém země-vzduch). Pro funkčnost tohoto systému jsou potřeba hlubinné vrty do země, avšak princip činnosti je stejný. Po zjednodušení lze říci, že se v podstatě jedná o stejný princip jako u domácí chladničky. Soustavu tvoří kompresor, tělesa na příjem tepla a tělesa na výdej tepla spojené do okruhu plněného speciálním médiem.

Solární systémy

Slunce je obrovskou zásobárnou energie. Každou sekundou spaluje termonukleární reakce na Slunci miliony tun vodíku. Vlastně se jedná o jadernou syntézu, při níž dochází k slučování jader vodíku za vzniku helia. Při této reakci se uvolňuje velká energie, jejíž část se dostane k Zemi. Mnohem menší část pak dopadá na zemský povrch. Brání tomu zemská atmosféra.

Solární kolektory z onoho malého procenta dokáží využít jen část. Obvykle to bývá od 30 % do 70 %. Do nedávna byly solární panely doménou bohatých. Bylo tomu tak díky nízké účinnosti, vysoké pořizovací ceně, a tedy dlouhé doby návratnosti. Dnes už je situace o něco lepší. Pořizovací náklady jsou sice stále poměrně vysoké, ale doba návratnosti je již nižší (okolo 15ti let). Cena kolektoru je asi jedna třetina celkových pořizovacích nákladů. Životnost kolektorů se pohybuje údajně až kolem 30ti let (osobně jsem vůči tomuto údaji

skeptický). Neměl jsem možnost tento systém v praxi pozorovat, ale předpokládám, že se časem účinnost solárních panelů snižuje. Hlavním důvodem jsou nečistoty a v zimě snůh.

Solární systémy se používají hlavně k ohřevu topné užitkové vody (TUV), k ohřívání vody v bazénu nebo na přitápění domů. Jako samostatný topný systém jsou ale nevhodné, protože v zimě je účinná sluneční energie dopadající na zemský povrch nízká. Hlavní a asi i jedinou markantní výhodou je ekologičnost tohoto systému.

Jelikož nás zajímá chování vytápěného systému jako takového, budeme v další části uvažovat jako zdroj elektrický kotel.

2.1 Základy termodynamiky

Teplo je definováno jako část vnitřní kinetické energie, která přejde při styku dvou těles s různou teplotou z tělesa teplejšího na těleso chladnější. Teplo má stejnou fyzikální jednotku jako energie. Teplo Q , které látka přijala, je rovno součtu přírůstků vnitřní energie ΔU látky a práce A , kterou látka vykonala

$$Q = \Delta U + A. \quad (2.1)$$

Tuto rovnici (2.1) vyjadřující zákon zachování energie nazýváme první věta termodynamická.

Pro některé výpočty budeme později potřebovat pojem měrná tepelná kapacita. Jedná se o konstantu, která je pro každou látku jiná a můžeme ji nalézt ve fyzikálních tabulkách. Udává množství tepla potřebné k zahřátí 1 kg látky o 1 K. Měrná tepelná kapacita se uvádí při konstantním objemu c_V nebo při konstantním tlaku c_p

$$c = \frac{1}{m} \left(\frac{\partial Q}{\partial T} \right). \quad (2.2)$$

Pro kapaliny a pevné látky je teplotní změna objemu velmi malá, proto ji lze zanedbat a uvažovat rovnost

$$c = c_V = c_p = \frac{1}{m} \frac{U}{\Delta T}. \quad (2.3)$$

Protože není vykonávána práce, lze z první věty termodynamické (2.1) vyvodit známý vztah pro stanovení tepla potřebného k ohřátí látky na určitou teplotu

$$Q = \Delta U = m c \Delta T. \quad (2.4)$$

V našem případě se budeme většinou zabývat ohřevem vzduchu v místnosti, bude nás tedy zajímat chování plynu. To je poněkud komplikovanější. Při ohřívání vzduchu dochází k jeho rozpínání. Z tohoto důvodu se zavádí tzv. molární tepelná kapacita.

Modifikovaná první věta termodynamická pro plyny je

$$\partial Q = n C_V (T_2 - T_1) + \int_{V_1}^{V_2} P(V) dV. \quad (2.5)$$

V našem případě se jedná o místnost s pevnými stěnami, která není dokonale uzavřena, lze tedy uvažovat tlak v místnosti konstantní a rovný atmosferickému. Uvažujme tedy

neustálou výměnu vzduchu (ztráty). Při ohřevu vzduch nekoná žádnou práci, integrál v předchozím výrazu (2.5) bude tedy nulový.

Pro ohřev plynu platí známý vztah

$$pV = nRT, \quad (2.6)$$

kde

p je tlak	[Pa],
V je objem	[m ³],
n je počet molů plynu	[mol],
$R = 8.3144$ je plynová konstanta	[J mol ⁻¹ K ⁻¹],
T je teplota	[K].

V našem případě při změně teploty vzduchu, ať už při ohřevu nebo ochlazení vzduchu v místnosti, bude tlak p konstantní a rovný tlaku atmosferickému. Objem místnosti V je dán zdmi dané místnosti a bude tedy též konstantní.

Po úpravě tedy máme

$$k = nT. \quad (2.7)$$

Nás ze vztahu (2.7) zajímá teplota T , tedy

$$T = \frac{k}{n}. \quad (2.8)$$

Počet molů plynu n v daném objemu za daného tlaku je možné interpretovat jako hustotu plynu. Z toho tedy vyplývá, že při zavedení korekce změny hustoty vzduchu při jeho ohřevu můžeme s dostatečnou přesností použít vztah 2.4. Na druhou stranu nás zajímají teploty v místnosti, tedy teploty v rozsahu (uvažujme termodynamickou teplotu) 273 K až 300 K, dle obrázku (??) je pouze malý úsek paraboly a lze tento vliv zanedbat. To znamená, že zavedením korekce změny hustoty vzduchu se významné chyby nedopustíme.

2.2 Tepelná vodivost

Množství tepla Q procházející libovolným průřezem tyče za čas t je přímo úměrné velikosti průřezu tyče S , času t , rozdílu teplot $(T_1 - T_2)$ obou konců tyče a nepřímo úměrné délce tyče l , tedy

$$Q = \lambda S \frac{T_2 - T_1}{l} t, \quad (2.9)$$

kde konstanta úměrnosti λ [Wm⁻¹K⁻¹] je součinitel tepelné vodivosti daného materiálu.

Přestupuje-li teplo rozhraním, které odděluje tuhou látku od plynu nebo kapaliny, potom množství prošlého tepla Q je

$$Q = \alpha S(T_1 - T_1')t, \quad (2.10)$$

kde α [$Wm^{-2}K^{-1}$] součinitel přestupu tepla rozhraním.

Hustota tepelného toku q je množství tepla, které projde plošnou jednotkou postavenou kolmo na směr šíření tepla za jednotku času, tedy

$$q = \frac{Q}{St}. \quad (2.11)$$

V našem případě se budeme zajímat o tepelný tok stěnou. Hustota tepelného toku všemi plochami rovnoběžnými s povrchem stěny je za ustáleného stavu stejná. Pro přestup tepla uvnitř místnosti platí

$$q = \alpha(T_1 - T_a). \quad (2.12)$$

Hustota tepelného toku je přímo úměrná tepelnému spádu dle vztahu

$$q = -\lambda \frac{dT}{dn}. \quad (2.13)$$

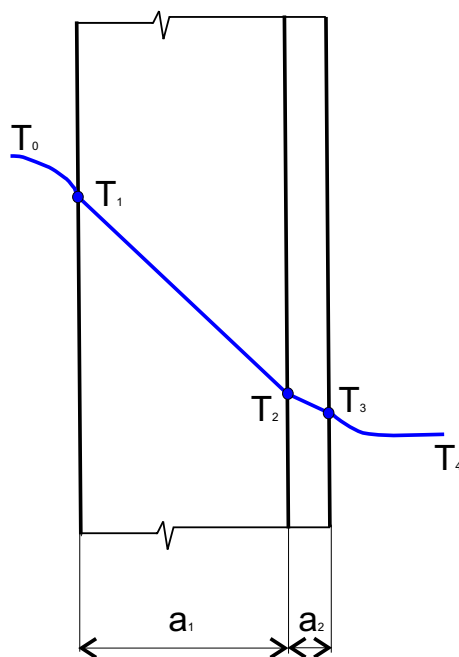
Uvažujeme stěnu dle obrázku 3.1. Pro hustotu tepelného toku bude platit

$$q = \lambda \frac{T_1 - T_2}{a}. \quad (2.14)$$

Kapitola 3

Tepelná prostupnost a izolace

Podle obrázku 3.1 uvažujeme stěnu složenou ze dvou různých vrstev. Pro několik typů respektive tloušťek stěn si zde dopředu, pro pozdější urychlení, spočteme konstanty pro únik tepla zkrz stěny.



Obrázek 3.1: Prostupnost stěnou

Pro přestup tepla uvnitř místnosti platí

$$q = \alpha(T_2 - T_1), \quad (T_2 - T_1) = \frac{q}{\alpha}. \quad (3.1)$$

Teplotní spád je roven rozdílu teplot povrchů stěny dělené tloušťkou stěny

$$\frac{dT}{dn} = \frac{\Delta T}{a}. \quad (3.2)$$

Hustota tepelného toku v první části bude

$$q = \lambda_1 \frac{T_0 - T_1}{a_1}, \quad (T_1 - T_0) = q \frac{a_1}{\lambda_1}. \quad (3.3)$$

Hustota tepelného toku v druhé části stěny bude

$$q = \lambda_2 \frac{T_2 - T_3}{a_2}, \quad (T_3 - T_2) = q \frac{a_2}{\lambda_2}. \quad (3.4)$$

Pro přestup tepla venku platí

$$q = \alpha(T_3 - T_4), \quad (T_3 - T_4) = \frac{q}{\alpha}. \quad (3.5)$$

Sečtením druhých rovnic (3.1), (3.3), (3.4) a (3.5) dostaneme

$$T_0 - T_1 + T_1 - T_2 + T_2 - T_3 + T_3 - T_4 = q \left(\frac{1}{\alpha} + \frac{a_1}{\lambda_1} + \frac{a_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha} \right), \quad (3.6)$$

tedy

$$q = (T_0 - T_4) \left(\frac{1}{\alpha} + \frac{a_1}{\lambda_1} + \frac{a_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha} \right)^{-1} = K(T_0 - T_4). \quad (3.7)$$

Konstanta K [$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$] vyjadřuje součinitel přestupu tepla stěnou.

Kapitola 4

Měřicí senzory

4.1 Senzory teploty

Senzorů pro měření teploty existuje celá řada. Jednotlivé typy se mohou lišit například svými parametry, fyzikálními principy i rozsahy. Nás zajímají elektrické (například odporové, polovodičové, termoelektrické, krystalové atd.).

4.1.1 Termoelektrické senzory teploty

Termoelektrické senzory pracují na principu Seebeckova jevu, tedy převodu tepelné energie na elektrickou. Seebeckův jev je charakteristický vznikem termoelektrického napětí ve spojených vodičích, jejichž konce mají různou teplotu obr. 4.1 vlevo. Termočlánek vznikne rozpojením jednoho konce viz obr. 4.1 vpravo. Napětí na termočlánek je dáno Seebeckovými koeficienty, které závisí na efektivní stavové hustotě a koncentraci nosičů náboje daných materiálů.

Pro elektromotorické napětí E_{AB} a absolutní teploty spojů platí experimentálně zjištěný vztah

$$E_{AB} = (a_A - a_B)(T_2 - T_1) + 0,5(b_A - b_B)(T_2 - T_1)^2, \quad (4.1)$$

kde

E_{AB} - elektromotorické napětí,
 a, b - Seebeckovy koeficienty a
 T_1, T_2 - teploty.

V následující tabulce jsou uvedeny Seebeckovy koeficienty pro nejčastěji používané kovy v termočláncích. Koeficienty a, b jsou závislé na přesném složení materiálu a jeho struktuře. Hodnoty uvedené v tabulce je z tohoto důvodu třeba brát s rezervou.

Termočlánek bývá obvykle vyroben ze dvou tenkých vodičů o průměru 0.1–0.5 mm, které jsou na konci svařené a uloženy v keramické dvojkapiláře. Napětí článku se obvykle měří kompenzátozem nebo jiným citlivým přístrojem měřícím stejnosměrný proud.

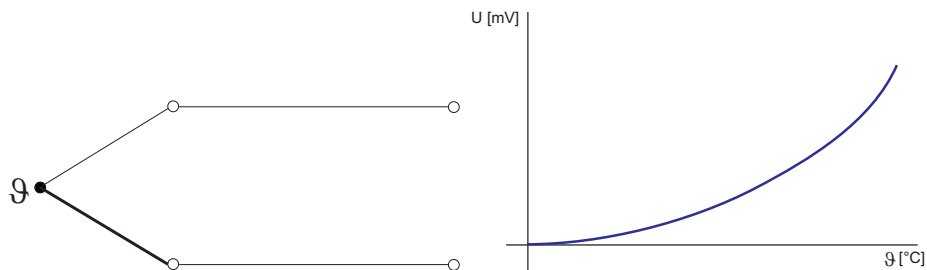
Nevýhodou termočláneků je zejména cena. V našem případě k měření termočláneků nepoužijeme, protože zde není jejich použití především z ekonomického hlediska výhodné.

Kov	a [μVK^{-1}]	b [μVK^{-1}]
Antimon	35.6	0.145
Bizmut	-74.4	0.032
Konstantan	-38.1	-0.0888
Měď	2.71	0.0079
Nikl	-19.1	-3.02
Platina	-3.03	-3.25
Železo	16.7	-0.0297

Tabulka 4.1: Seebeckovy koeficienty udány vzhledem k olovu

Kov	T_{min} [$^{\circ}\text{C}$]	T_{max} [$^{\circ}\text{C}$]
Konstantan - Cu	-200	400
Konstantan - Fe	-200	950
Pt - Pt + 6 nebo 10 % Rh	-200	1300

Tabulka 4.2: Rozsahy nejběžnějších termočlánků



Obrázek 4.1: Znázornění termočlánku a jeho charakteristika

4.1.2 Radiční pyrometry

Do další skupiny teplotních senzorů patří radiční pyrometry (thermopile sensors). Radiční pyrometry nebo také infratermočlánky, jsou senzory pro bezdotykové měření povrchové teploty objektů. Jde o zahřívání termočlánků infračerveným zářením, které vysílá každý objekt o určité teplotě. Vyrábí se integrovanou technologií.

Mezi hlavní výhody používání bezdotykových teploměrů patří

- rychlost - řádově v milisekundách,
- možnost měření teploty pohybujících se objektů,
- bezpečnost měření,
- možnost měření velmi vysokých teplot (nad 1300°C),
- nedochází k ovlivnění měřeného objektu

- a nejsou zde žádné mechanické účinky na povrch měřeného objektu (např. v potravinářství je naprosto hygienické).

Hlavní nevýhody

- měřený objekt musí být pro infračervený teploměr opticky (infračerveně) viditelný,
- optika čidla musí být chráněna před prachem a kondenzujícími kapalinami,
- možnost měření pouze povrchové teploty, přičemž je potřeba brát ohled na různou emisivitu jednotlivých materiálů.

Tento druh senzorů se používá zejména pro detekci ohně a plamenů, měření vysokých teplot a měření teploty pohyblivých předmětů.

4.1.3 Inteligentní senzory teploty

Další skupinu teplotních senzorů tvoří takzvané inteligentní senzory teploty. Jedná se především o polovodičové integrované obvody. Ty již obsahují snímač teploty integrovaný přímo na chipu např. PN přechod. Senzor pak dále provádí zpracování signálu (linearizace, korekce, redukce šumu apod.) a hlavně téměř vždy A/D převod pro digitální výstup. Mnohdy se u těchto senzorů vyskytují i přídavné funkce jako jsou různé režimy snížení spotřeby energie, nastavení rozsahu s indikací jeho překročení.

Mezi nejběžnější inteligentní senzory teploty patří TMP141 firmy Texas Instruments, LM83 a LM76 firmy National Semiconductor, MAX6610/6611 a MAX6680/6681 firmy MAXIM a AD7414/7415 firmy Analog Devices. Většinou se liší napájecím napětím (kolem 3.3 nebo 5 V), spotřebou, měřícím rozsahem, přesností, rozlišením (obvykle 10 bitů), použitým druhem A/D převodníku a výstupním rozhraním (obvykle sběrnice kompatibilní s SMBus a I2C).

4.1.4 Termistory

Termistory se řadí do skupiny odporových polovodičových teplotních senzorů. Rozsahy termistorů bývají dány použitým materiálem.

Termistory dělíme dle charakteristik na dvě základní skupiny - negastory a pozistory.

Negastory jsou termistory se záporným teplotním součinitelem odporu. Jejich rozsahy se pohybují od -50 do 150 °C a v oblastech extrémně nízkých teplot 4.2 K i teplot vysokých kolem 1000 °C.

Teplotní závislost přibližně odpovídá vztahu

$$R = Ae^{\frac{B}{T}}, \quad (4.2)$$

kde A [Ω] je konstanta geometrického tvaru a materiálu, B [K] je teplotní konstanta, T [K] je teplota.

Hodnoty teplotní konstanty B se pohybují v rozsahu 1500 K až 7000 K.

Pozistory jsou, jak už název napovídá, termistory s kladným teplotním součinitelem odporu. Vyrábějí se z feroelektrické keramiky. Odpor pozistoru s teplotou nejprve mírně klesá, pak prudce roste. Z tohoto důvodu se pozistory obvykle používají jako dvoustavové

senzory pro signalizaci překročení maximálně přípustné teploty. Pro růst odporu platí vztah

$$R = R_r e^{A\vartheta}, \quad (4.3)$$

kde referenční hodnota konstanty je $A = 0.16 \text{ K}$.

4.1.5 Odporové senzory teploty

Odporové senzory teploty využívají teplotní závislosti odporu kovu na teplotě. Materiálovou konstantou pro závislost odporu na teplotě je α teplotní součinitel odporu. Pro α platí

$$\alpha = \frac{1}{R} \frac{\partial R}{\partial \vartheta}. \quad (4.4)$$

Pro běžné kovové teploměry lze v rozsahu $0 - 100 \text{ }^\circ\text{C}$ použít vztah

$$R = R_0(1 + \alpha\vartheta), \quad (4.5)$$

kde $\alpha [\text{K}^{-1}]$ je teplotní součinitel odporu, ϑ je teplota ve $^\circ\text{C}$, R_0 je odpor teploměru při $0 \text{ }^\circ\text{C}$.

Pro teplotní součinitel odporu platí

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{100 R_0}, \quad (4.6)$$

kde R_{100} je odpor při teplotě $100 \text{ }^\circ\text{C}$.

Pro větší rozsahy platí nelineární rovnice v závislosti na použitém kovu. Nejrozšířenějšími odporovými teploměry jsou teploměry platinové. Kromě platiny se používá nikl, měď, molybden, dále pro speciální případy (extrémně nízké teploty od 0.5 K) slitiny Rh-Fe, Pt-Co.

Niklový kovový teploměr

Niklové teploměry se vyrábí tenkovrstvou technologií na keramické podložce z jemnozrného korundu. Niklová vrstva se upravuje laserem na požadovaný odpor. Výhodou niklových teploměrů je velká citlivost, rychlá časová odezva a malá velikost. Nevýhodou je omezený teplotní rozsah a vzhledem k platinovým teploměrům velká nelinearita. Pro rozsah od -60 do $180 \text{ }^\circ\text{C}$ platí rovnice

$$\frac{R_\vartheta}{R_0} = [1 + A\vartheta + B\vartheta^2 + C\vartheta^3(\vartheta - 100)], \quad (4.7)$$

kde

$$\begin{aligned} A &= 5.49 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1} \\ B &= 6.80 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-2} \\ C &= 9.24 \cdot 10^{-9} \text{ K}^{-3} \quad \text{pro } \vartheta > 0 \text{ }^\circ\text{C} \\ C &= 0 \quad \text{pro } \vartheta < 0 \text{ }^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Při použití materiálových příměsí je možné dosáhnout změny pracovního rozsahu. Do niklu se přidává např. mangan, který má za následek měřící rozsah již od $\vartheta = -196 \text{ }^\circ\text{C}$.

Platinové teplotní senzory

Platina se vyznačuje chemickou netečností, časovou stálostí a vysokou teplotou tání. Měřicí odpor může být vyroben buďto drátkovou technologií, tenkovrstvou technologií nebo tlustovrstvou technologií.

Drátkový měřicí odpor je tvořen spirálově stočeným platinovým drátkem o průměru od 0.01 do 0.05 mm, který je zataven do keramiky nebo do skla. Drátek může být též navinut na pertinaxové nebo slídové podložce.

Čistota platiny se posuzuje podle tzv. redukováného odporu

$$W_{100} = \frac{R_{100}}{R_0} \geq 1.385. \quad (4.8)$$

Standartně se vyrábějí senzory PT100 s odporem 100 Ω při 0°C. Kromě těchto se též vyrábí Pt senzory 50, 200, 500, 1000 a 2000.

Pro rozsah teplot od -200 do 850 °C platí pro teplotní závislost vztah

$$R_{\vartheta} = R_0[1 + A\vartheta + B\vartheta^2 + C\vartheta^3(\vartheta - 100)], \quad (4.9)$$

kde platí

$$\begin{aligned} W_{100} &= 1.385 \\ R_0 &= 100 \Omega \\ A &= 3.90802 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1} \\ B &= -5.802 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-2} \\ C &= -4.27350 \cdot 10^{-12} \text{ K}^{-4} \quad \text{pro } \vartheta \leq 0^\circ\text{C} \\ C &= 0 \quad \text{pro } \vartheta > 0^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Chyba při 0 °C ve vyšší třídě přesnosti odpovídá $\pm 0.125^\circ\text{C}$ tedy $\pm 0.06 \Omega$. Pro nižší třídu přesnosti bude chyba $\pm 0.25^\circ\text{C}$ tedy $\pm 0.12 \Omega$.

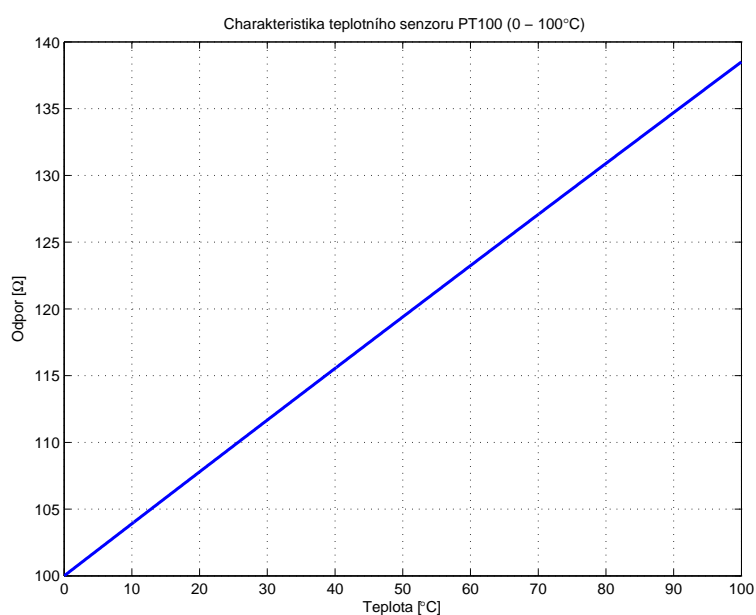
Platinovými teplotními senzory se budeme podrobněji zabývat, konkrétně senzorem PT100.

Veškeré měřené teploty, pokud není uvedeno jinak, jsou měřeny senzory PT100. Bylo tak zvoleno vzhledem k dostupnosti, ceně, požadované přesnosti a nenáročnosti zpracování výstupu. Pro tuto aplikaci jsou naprosto vyhovující.

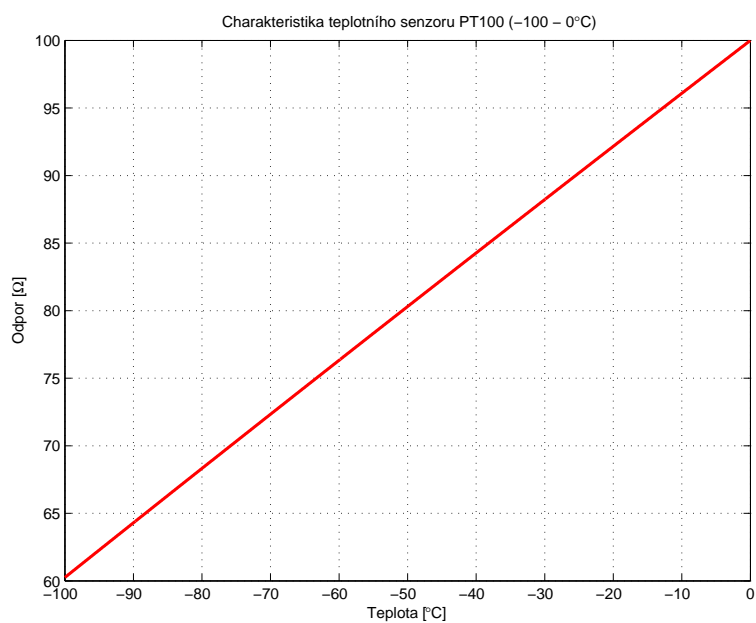
Odporové senzory teploty typu PT100 jsou určeny pro měření teploty v rozsahu od -200 °C do +800 °C. Princip měření spočívá ve změně elektrického odporu platinového drátu v závislosti na teplotě. Platinové keramické měřicí odpory mají nejčastěji podobu keramického válečku o průměru 3 nebo 3.8 mm a délky od 17 mm. Dále jsou k dispozici japonská čidla ve tvaru keramické destičky s napařenou platinovou vrstvou. Rozměr tohoto čidla je 1.6 × 3, 2 × 1.0 mm. Podle přesnosti se tyto snímače dělí do tří tříd: třída přesnosti A s tolerancí 0.15 °C, třída přesnosti B s tolerancí 0.30 °C a třída přesnosti C s tolerancí 0.60 °C. Všechny uvedené tolerance platí pro teplotu 0 °C.

Přechodová charakteristika

Na obrázcích 4.2 a 4.3 je znázorněna charakteristika senzoru PT100 určená ze vztahu (4.9). Jak je vidět, lze ji v našem rozsahu s minimální odchylkou považovat za lineární. Tato skutečnost měla značnou váhu při volbě senzorů.



Obrázek 4.2: Charakteristika senzoru PT100



Obrázek 4.3: Charakteristika senzoru PT100

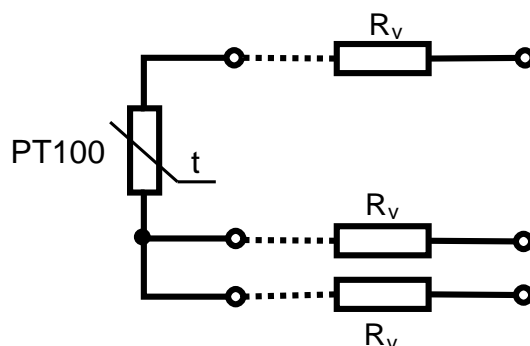
Teplota [°C]	Odpor [Ω]	Teplota [°C]	Odpor [Ω]
0	100.00	0	100.00
-10	96.09	10	103.90
-20	92.16	20	107.79
-30	88.22	30	111.67
-40	84.27	40	115.54
-50	80.31	50	119.40
-60	76.33	60	123.24
-70	72.33	70	127.08
-80	68.33	80	130.90
-90	64.30	90	134.71
-100	60.26	100	138.51

Tabulka 4.3: Převodní tabulka senzoru PT100

Převodní tabulka

Pro naše účely postačí, že zmíníme pouze část rozsahu senzoru.

Aby bylo možné vyloučit vliv chyby měření, je pro každý senzor PT100 použito tzv. třívodičové zapojení. Při použití klasického dvouvodičového zapojení totiž dochází k chybě vlivem odporu vedení. K odporu senzoru se přičítá odpor vedení, který může být vlivem okolní teploty pokaždé jiný. Při použití třívodičového zapojení je možné tyto chyby kompenzovat. Jak je vidět z obrázku 4.4, jsou vedeny dva vodiče paralelně a jejich odpor je stejný. Jako měřící zapojení pak může posloužit například pasivní odporový můstek nebo aktivní, s operačním zesilovačem. Více informací je možné nalézt v literatuře [1].



Obrázek 4.4: Třívodičové zapojení senzoru PT100

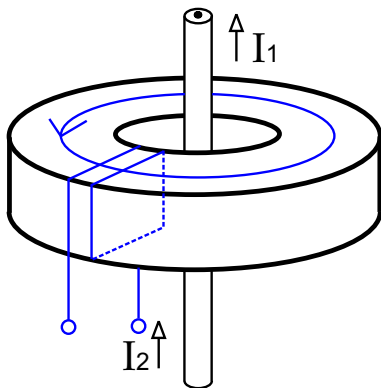
Důležité je i dané senzory vhodně umístit. Jde o to, aby jejich výstupy nebyly ovlivňovány náhodnými vlivy, jako je třeba poryv větru. Vhodným umístěním senzorů můžeme předejít mnoha poruchám i chybám v regulaci. Senzory venkovních teplot se umísťují z pravidla na severní stranu budovy a do závětrí. Jak je uvedeno dále, měly by být

teplotní senzory chráněny před slunečním zářením. Senzory teplot uvnitř budov je také potřeba vhodně umístit. Je nutné, aby byly tepelně odizolovány od stěny na níž jsou namontované. Obvykle se též nemontují na obvodové zdivo. Je důležité, aby byly tyto senzory mimo dosah proudění vzduchu ze zdrojů tepla (nemontují se nad topná tělesa nebo ke dveřím). Vhodnou montáží senzorů je možné předejít často těžko vysvětlitelným chybám regulace v celém systému.

4.2 Snímač průtoku

Snímače průtoku byly nezbytné vzhledem k nutnosti měřit spotřebu teplé a studené vody. S využitím znalosti spotřeby teplé vody je možno snadno určit ze spotřebované energie, kolik energie bylo využito na topení a kolik činí ztráty. K měření průtoků byly použity standartní vodárenské vrtulkové průtokoměry, určené k měření spotřeby vody rodinných domů. Přesnosti a parametry těchto průtokoměrů jsou závislé na druhu proudění. Předpokládáme-li laminární proudění, je přesnost těchto přístrojů dostačující. Jinak je tomu, jedná-li se o proudění turbulentní, kdy tento druh přístroje nelze použít.

4.3 Senzor pro měření spotřeby elektrické energie



Jak je zřejmé z obrázku, pro měření odběru elektrické energie je použit toroidní transformátor proudu. Podobného principu se užívá v klešťových ampermetrech. Spotřeba na každé fázi je sledována separátně, z důvodu nerovnoměrného rozložení zátěže. Jsou tedy použity tři stejné transformátory proudu. Toto uspořádání má obrovskou výhodu, protože je možné do programu regulátoru přidat rutinu, která bude hlídat aktuální odběr. V případě potřeby, aby nevypínaly jističe, se potom sníží topný výkon, než na dané fázi klesne odběr.

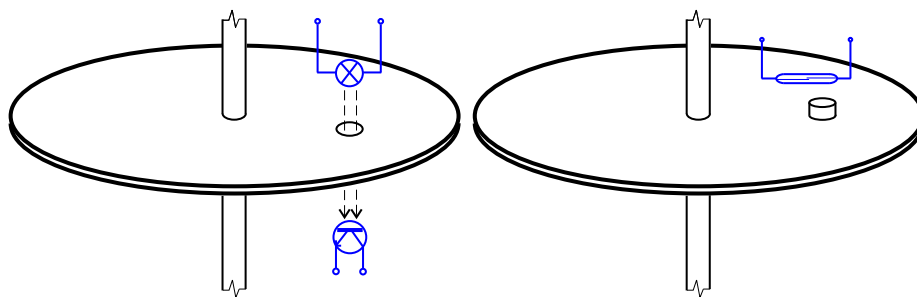
Pro přepočítání je využit jednoduchý vzorec (4.10), kde k je převodní konstanta transformátoru proudu (v našem případě počet závitů na toroidu), U napětí (považujeme za konstantní 230 V). Počet závitů byl zvolen tak, aby se výstupní proud dobře měřil, aby se vešel do rozsahu 0 – 20 mA. Zlomky ve výrazu slouží k převodu ze základních jednotek. Výsledkem je spotřeba elektrické energie v kWh .

$$A = \frac{1}{1000} \frac{1}{3600} k U \int_T i(t) dt \quad (4.10)$$

4.4 Senzor pro měření rychlosti větru

Jako senzoru pro měření rychlosti větru jsem použil svépomocí zhotovený "větrník", podobný jako se používá v meteorologických stanicích. Je založen na principu snímání otáček a je kalibrován empiricky. Pro naše účely a s ohledem na jednoduchost jsem místo klasické optické závory obr. 4.5, volil stejný princip jako se používá u tachometru na jízdním kole,

tedy jazýčkový kontakt ve skle a magnet, jak je vidět na témže obrázku. V praxi se tato metoda měření neosvědčila, především se vyskytovaly problémy s cejchováním a vhodnou interpretací v modelu systému. Z tohoto důvodu, stejně jako u měření vlivu slunečního záření, jsem přistoupil, jak je uvedeno u příslušného modelu, k měření důsledků těchto efektů. Jedná se o významné zjednodušení, aniž by došlo ke vzniku významných chyb. Další výhodou tohoto přístupu je úspora finančních prostředků za senzory a též úspora vstupů řídicího systému.



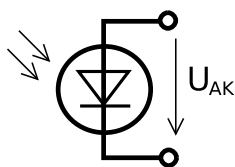
Obrázek 4.5: Běžné principy snímání otáček

4.5 Senzor slunečního svitu

Pro měření intenzity slunečního svitu lze použít buďto různé svépomocí zhotovené "náhražky" nebo specializované senzory. Senzory specializované pro tento druh měření jsou pro naše účely neúměrně drahé. V našem případě nám jde o vliv slunečního záření, nikoliv o velikost jeho intenzity. Je tedy možné použít fotosoučástky, například fotorezistor, fotodiodu nebo fototranzistor.

Činnost součástek řízených zářením je založena na fotoelektrickém jevu. Při dopadu záření určité vlnové délky λ dochází ke vzniku volných nosičů náboje elektron-díra. V látce bez přechodu PN dojde v důsledku toho ke zvětšení vodivosti. Dopadá-li záření do oblasti přechodu PN, objevuje se mezi částí P a N tzv. hradlové napětí (řádově desetiný voltu).

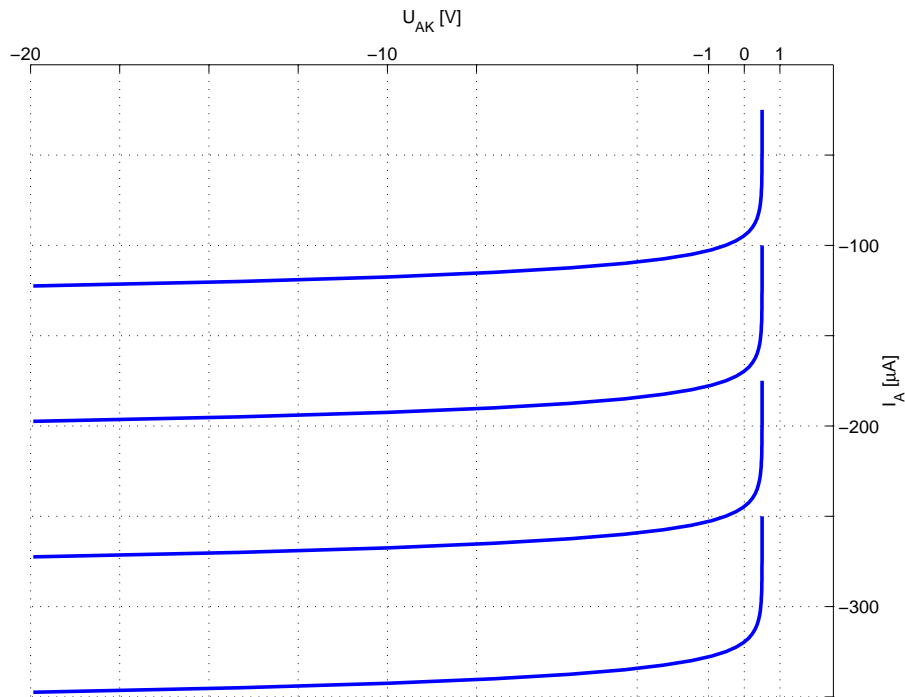
Fotodioda



Fotodioda je plošná polovodičová dioda upravená tak, aby do oblasti přechodu PN pronikalo světlo. Není-li přechod osvětlen, má voltampérová charakteristika fotodiody stejný průběh, jako má charakteristika běžné plošné diody. Největší rozdíl mezi osvětleným a neosvětleným stavem pozorujeme při polarizaci diody v závěrném směru ($U_{AK} < 0$; 3. kvadrant), kdy dochází k téměř lineárnímu růstu proudu I_A při rovnoměrném zvětšování osvětlení. Dioda se v těchto podmínkách chová jako pasivní součástka, jejíž odpor je závislý na osvětlení (odporový režim činnosti diody).

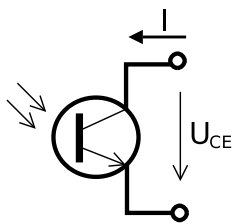
Část charakteristik probíhajících 4. kvadrantem odpovídá hradlovému režimu činnosti fotodiody. Zde se součástka chová jako zdroj elektrické energie. Na anodě má kladné napětí několik desetin voltu. Proud závisí na osvětlení lineárně, kdežto napětí přibližně

logaritmicky. Proto, chceme-li využít hradlové činnosti diody k měření osvětlení, uijeme zapojení v hradlovém režimu. Snažíme se o to, aby dioda pracovala nakrátko. Proto musí být odpor mikroampérmetru co nejmenší. Pak je stupnice lineární. V propustné oblasti charakteristik (1. kvadrant) se vliv osvětlení projevuje minimálně. Fotodioda reaguje na změny osvětlení velmi rychle (řádově sekundy).



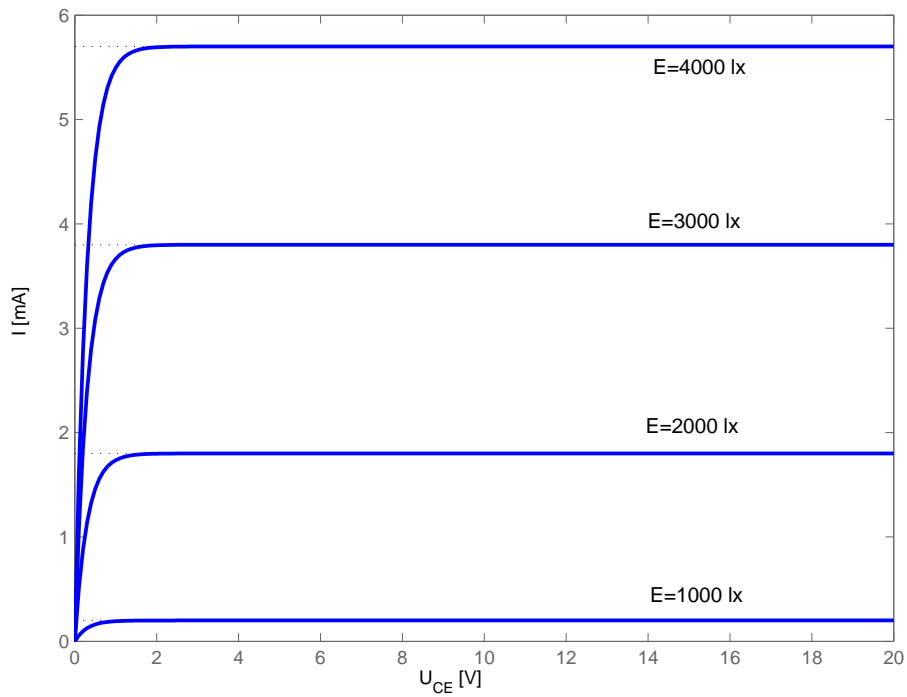
Obrázek 4.6: Voltampérová charakteristika fotodiody

Fototranzistor

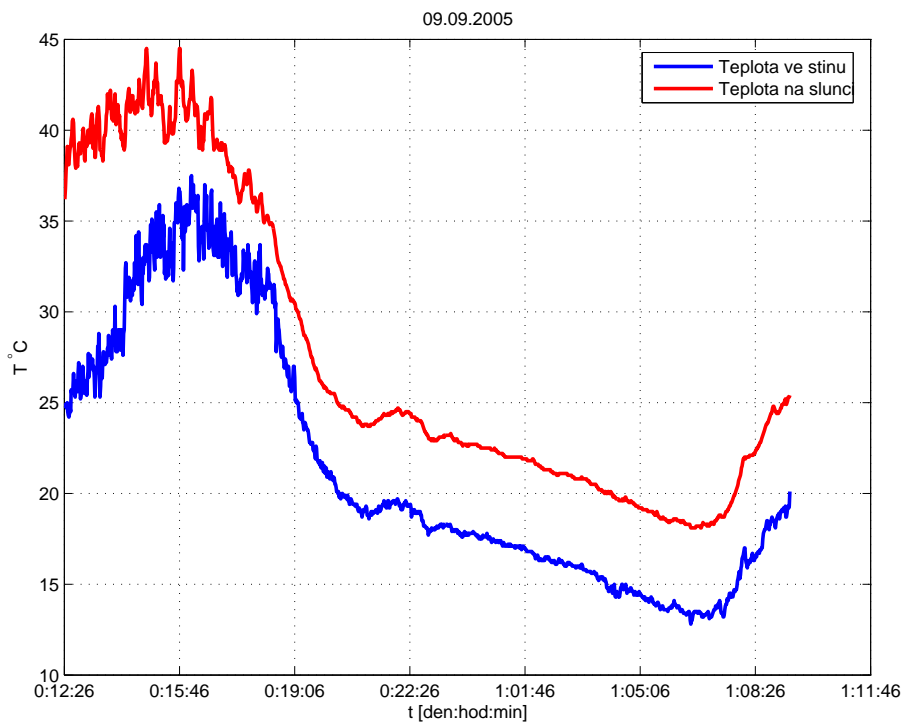


Místo vstupního proudu přiváděného do báze běžných bipolárních tranzistorů se k řízení kolektorového proudu u fototranzistorů využívá světelné energie. Světlo proniká do oblasti přechodu báze-emitorka okénkem v pouzdru uzavřeném skleněnou čočkou. Charakteristika fototranzistoru je tedy stejná jako charakteristika běžného bipolárního tranzistoru. Liší se pouze tím, že parametrem není proud báze, ale intenzita osvětlení PN přechodu. Na obrázku 4.7 jsem znázornil pro ilustraci charakteristiku fototranzistoru TESLA KP101.

Další možností je použití solárního elektrického článku (např. ze staré kalkulačky). Stejně jako u fotosoučástek, vzniká problém s cejchováním. Jinou možností nepřímého měření vlivu slunce je měření teploty ve stínu a teploty na slunci. Z jejich rozdílu pak lze určit vliv slunečního záření. Na obrázku 4.8 je vidět značný rozdíl teplot. Místy rozdíl dosahuje až 10°C . Tento rozdíl bude záviset na materiálu obalu senzoru, který je vystaven slunečnímu záření, a také jeho velikosti a možnosti chlazení.



Obrázek 4.7: Voltampérová charakteristika fototranzistoru



Obrázek 4.8: Venkovní teploty ve stínu a na slunci

Kapitola 5

Regulace

V této kapitole navrhujeme regulátory pro regulaci teplot v místnostech. Zmíníme se o dvou způsobech takové regulace. První je způsob tzv. regulace podle jedné místnosti. Druhým způsobem rozumíme regulaci každé místnosti zvlášť.

V případě regulace podle jedné místnosti (referenční, obvykle nejchladnější) se reguluje teplota tak, aby i v zde byla přijatelná teplota. Tento způsob je poněkud zastaralý a těžkopádný. Jeho výhodou jsou nižší pořizovací náklady. Senzory teploty nejsou v každé místnosti. Nejsou třeba akční členy pro otevírání a zavírání ventilů na radiátorech. Nevýhodou jsou například náklady za spotřebovanou energii. Tento způsob regulace totiž neumožňuje automaticky vyjmout nepotřebné místnosti z topného programu. Tato manipulace se musí provést ručně, například otočením kohoutku na radiátoru. Je to nepohodlný způsob. Omezuje možnosti časových programů. V týdnu, v pracovní době, stačí dětský pokoj a např. jedna přidružená místnost, ostatní místnosti jsou vytápěny samozřejmě také z důvodu snížení ztrát, ale pod normální požadovanou teplotu.

Druhý způsob znamená regulaci každé místnosti zvlášť. Tímto způsobem regulace se budeme podrobněji zabývat.

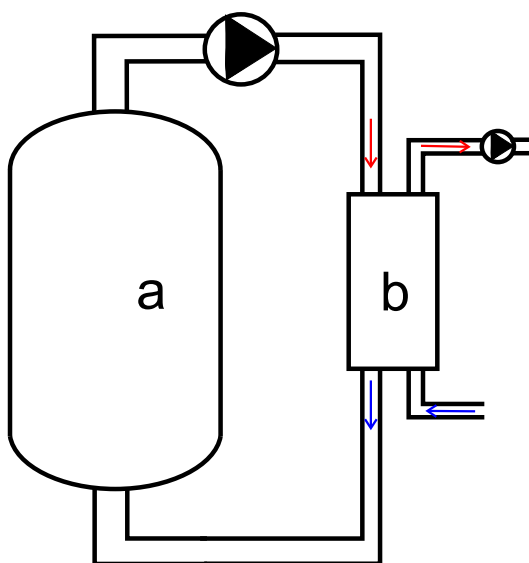
Každá místnost má tedy svůj senzor teploty, svůj akční člen a svoji žádanou hodnotu. Realizace je poněkud náročnější než u předchozí varianty. Řídicí systém musí mít více vstupů a výstupů, to bývá drahé. Docílíme tím však naprosté nezávislosti jednotlivých místností. Každá místnost tak může mít svůj vlastní časový program. Tím, že řídíme ventily u jednotlivých topných těles, můžeme usnadnit řízení hlavního kotle. Topíme-li současně na ohřev vody (TUV) a současně jen jedné místnosti, byla by škoda energii pouštět i tam, kde není potřeba.

Pro zajištění teplé vody, pokud používáme deskový výměník, je nutné, aby kotel byl předem vytopen na určitou teplotu. Pokud používáme pro ohřev vody elektrický boiler, tento problém odpadá a ohřev TUV se řeší separátně.

Protože naneštěstí nikdy nevíme přesně, kdy budeme potřebovat teplou vodu, je dobré buďto ji mít předeřátou v boileru nebo např. mít natopený elektrokotel a při požadavku (diferenční tlakový spínač) zapnout topné spirály a čerpadlo do deskového výměníku (obr. 5.1). V tomto případě je potřeba odpouštět studenou vodu (množství je dáno objemem potrubí od výměníku k baterii).

Pokud je budova vybavena nádrží na užitkovou vodu, jejíž ohřev se zajišťuje topnou vodou z hlavního kotle, je potřeba podle toho postupovat při realizaci regulačního

systemu. Například pokud je budova, v našem případě rodinný domek, vytopena a oběví se požadavek na TUV, vyplatí se odpojit na krátkou dobu zátěž (topná tělesa v místnostech) a dodávat plný výkon na ohřev zásobníku vody. Teplota v místnostech mezitím poklesne jen o malou míru, protože se předpokládá odběr jen určitého množství vody (například na koupel). Na druhou stranu, není-li budova vytopena, nepředpokládá se velká spotřeba vody (těžko se půjdeme koupat je-li v domě zima). Další výhodou takto distribuované regulace je i možnost prioritizace jednotlivých místností. V blízké budoucnosti bude mít každý člověk v těle implantován unikátní identifikační čip a bude jej možno na nějakou minimální vzdálenost rádiově přechíst. Osoba již vlastním vstupem do budovy aktivuje svůj program na topení. Je-li v domě, bude řídicí systém vědět, které místnosti pravidelně obývá, i kde se pohybuje a které žádané hodnoty upřednostňuje.



Obrázek 5.1: Ohřev TUV deskovým výměníkem

Na obrázku 5.1 je písmenem *a* označen kotel (ať už elektrický nebo jiný), který ohřívá topnou vodu, jež je vedena do primárního okruhu deskového výměníku (označen písmenem *b*). Do sekundárního okruhu se přivádí užitková voda pro ohřev.

Základní druhy regulace jsou

- spojitá,
- nespojitá,
- regulace podle časového programu a
- vlečná regulace.

5.1 Spojitá regulace

Při spojité regulaci pracují všechny členy regulačního obvodu spojitě a výstupy jsou spojitě funkce.

Spojité regulace se používají jako regulace výkonů kotlů a při škrcení pomocí ventilů ve větších systémech dodávajících teplo více odběratelům (např. teplárny). V menších systémech, jako je regulace v rodinných domech, nebývají častou záležitostí. Spojitá regulace vyžaduje vyšší pořizovací náklady. Spojité regulátory dělíme na lineární a nelineární.

Lineární regulátory jsou regulátory typů **P**, **PI** a **PID**.

Regulátor typu **P** je proporcionální regulátor. Výstupem regulátoru je pouze zesílená regulační odchylka, která je v ustáleném stavu nenulová. Jeho přenos je

$$R(s) = r_0. \quad (5.1)$$

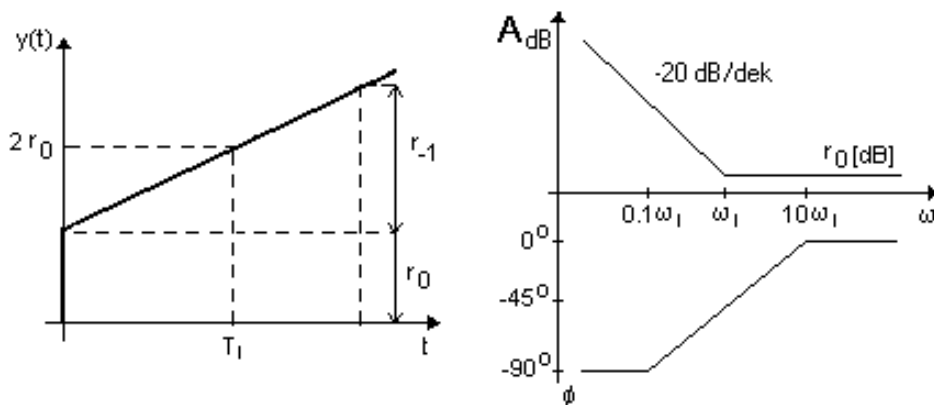
Regulátor typu **PI** je proporcionálně integrační regulátor. Integrační složka regulátoru zajišťuje nulovou regulační odchylku v ustáleném stavu. Čím je větší integrační konstanta, tím méně se uplatňuje integrační složka, a tím pomaleji se dosáhne nulové odchylky. Velmi malé hodnoty integrační konstanty mohou způsobit nestabilitu systému.

Přenos regulátoru typu **PI** je

$$R(s) = r_0 + \frac{r_{-1}}{s} = r_0 \left(\frac{r_{-1}}{r_0} \frac{1}{s} + 1 \right) = r_0 \left(\frac{1}{T_I} \frac{1}{s} + 1 \right), \quad (5.2)$$

kde T_I je integrační časová konstanta.

Na obrázku 5.2 vlevo je přechodová charakteristika a vpravo frekvenční charakteristika **PI** regulátoru. Z frekvenční charakteristiky je patrné, jak regulátor ovlivní přenášené frekvence.



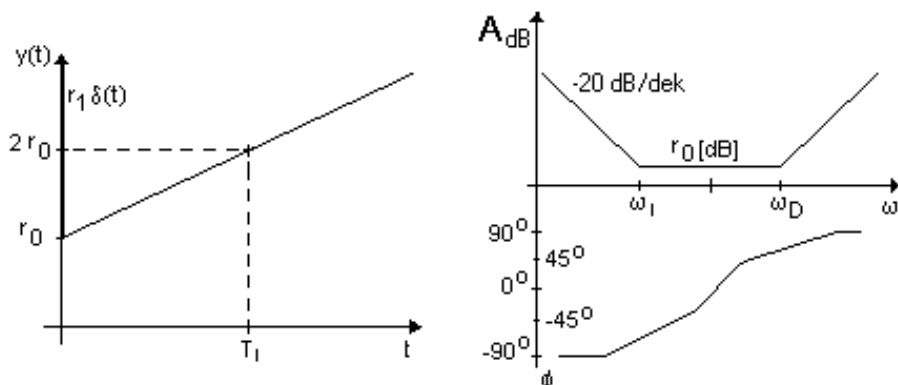
Obrázek 5.2: Přechodová a frekvenční charakteristika PI regulátoru

Regulátor typu **PID** je proporcionálně integračně derivační regulátor. Derivační složka zajišťuje reakci na intenzitu změny regulační odchylky. Princip **PID** regulátorů je vidět z rovnice

$$u(t) = K \left[e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(\tau) dx + T_D \frac{de(t)}{dt} \right]. \quad (5.3)$$

Proporcionální složka $K e(t)$ se zmenšuje se zmenšující se regulační odchylkou $e(t)$. Mohlo by se zdát, že velké zesílení K bude mít dobrý vliv na regulaci, protože volbou velkého zesílení snadněji dosáhneme minima regulační odchylky, ale není to tak úplně

pravda. Velké zesílení způsobuje rozkmitávání systému. Volba velikosti integrační a derivační složky je kompromisem mezi rychlostí regulátoru a velikostí překmitu přechodové charakteristiky uzavřené smyčky.

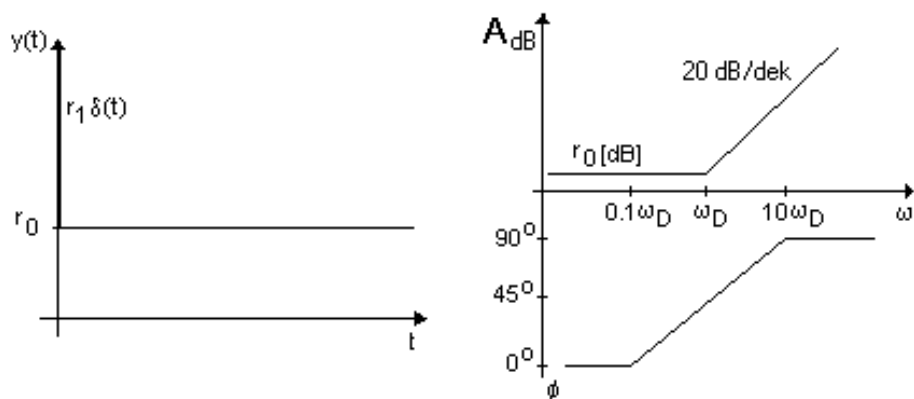


Obrázek 5.3: Přechodová a frekvenční charakteristika PID regulátoru

Regulátor typu **PD** zde záměrně uvádím na posledním místě, protože jeho použití v systémech, o kterých je řeč, není žádoucí. Tyto systémy mají velké časové konstanty, tedy pomalé změny. Jeho přenos je

$$R(s) = r_0 + r_1 s = r_0 \left(\frac{r_1}{r_0} s + 1 \right) = r_0 (T_D s + 1), \quad (5.4)$$

kde T_D je derivační časová konstanta. Derivační složka je úměrná změně regulační odchylky a působí proti ní. Vysoké hodnoty derivační konstanty mohou způsobit přílišnou citlivost na šum, což je vidět z frekvenční charakteristiky (obr. 5.4).

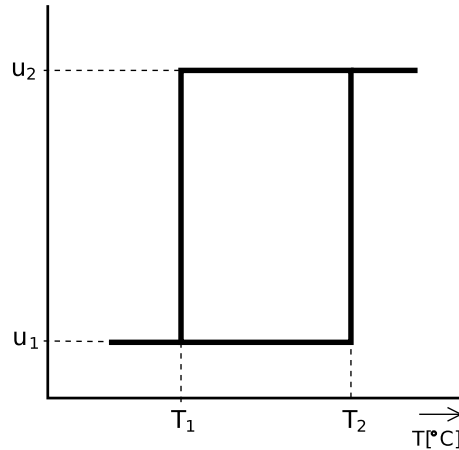


Obrázek 5.4: Přechodová a frekvenční charakteristika PD regulátoru

5.2 Nespojité regulace

Pro regulaci topných systémů je tento druh regulace dosti rozšířený. Nejčastěji se používá dvoupolohových regulátorů s hysterezí (obr. 5.5). Žádaná teplota obvykle leží v intervalu

T_1 a T_2 . Hodnoty akční veličiny u_2 a u_1 obvykle znamenají zapnuto – vypnuto (1 – 0). Ke změně stavu akční veličiny dojde teprve při dosažení meze T_1 nebo T_2 . Princip regulace je značně jednoduchý a snadno realizovatelný. To vede k nízkým nákladům a hojnému používání.



Obrázek 5.5: Charakteristika dvoupolohového regulátoru s hysterezí

Tyto regulátory bývají realizovány v podobě pokojových termostatů elektronicky nebo i programově v řídicím automatu. Ve většině aplikací v tepelných systémech dosahují dobré kvality regulace.

5.3 Vlečná regulace

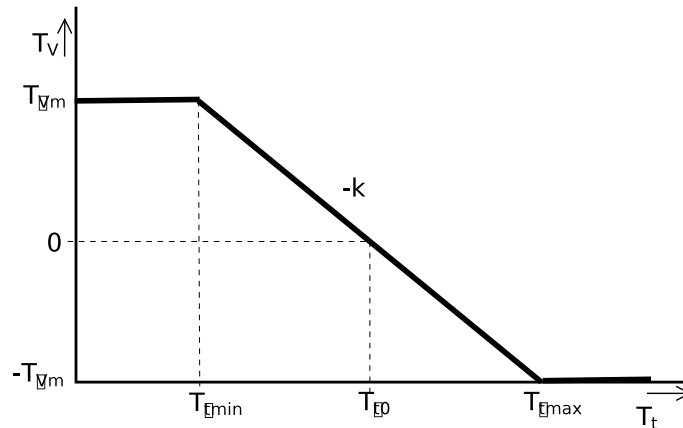
Tento druh regulace je také velmi rozšířený. Jedná se o regulaci teploty topného média (v našem případě vody) vzhledem k určité vztažné veličině, kterou může být například teplota nejchladnější místnosti nebo venkovní teplota. Pokud je vztažnou teplotou venkovní teplota, jedná se o ekvitermní regulaci.

Ekvitermní regulace

Ekvitermní regulace je charakteristická ekvitermní křivkou nebo též tzv. Z-charakteristikou. Jednu takovou charakteristiku, ve zjednodušeném tvaru, můžeme vidět na obrázku 5.6. Ekvitermní křivka je daná a pro každou určitou lokalitu charakteristická.

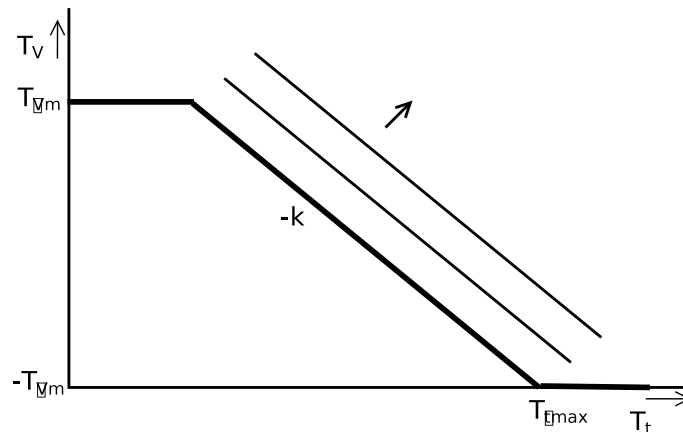
Na vodorovné ose v obrázku 5.6 je vynesena teplota topného média (pro jednoduchost uvažujme vodu), na svislé ose je venkovní teplota. Teplota T_{tmin} je minimální teplota topného média a T_{tmax} je maximální teplota. Hodnoty teplot t_{Vm} udávají interval venkovní teploty kdy topit. Číslo k je směrnice a udává poměr teploty topného média ku venkovní teplotě. Tedy klesne-li venkovní teplota o 1°C , musí se teplota topného média zvýšit o $k^{\circ}\text{C}$, aby byla zachována požadovaná hodnota teploty. Hodnota k je charakteristická pro každou budovu. Závisí na druhu konstrukce budovy i umístění budovy.

Na obrázku 5.7 je modifikace předchozího obrázku, znázorňující změnu Z-charakteristiky pro vyšší komfort. Směrnice zůstává stejná, protože je, jak již bylo řečeno, daná



Obrázek 5.6: Ekvitermní křivka

budovou, ale celá charakteristika se posouvá. S vyšším komfortem se posune výš. To znamená, že téže venkovní teplotě odpovídá vyšší teplota topného média.



Obrázek 5.7: Změna komfortu posunem ekvitermní křivky

Prediktivní regulace

Regulátory tohoto typu mají v paměti uložena data několik dnů zpět, podle kterých regulují. Jedná se vlastně o určení tendence chování venkovní teploty. Podle uloženého vzorku regulátor s předstihem nastaví odpovídající hodnotu. Tento regulátor obvykle dosahuje dobrých výsledků, ovšem za předpokladu plynulé a pozvolné změny venkovní teploty. Při skocích venkovní teploty vykazují značné chyby.

Kapitola 6

Systémy Teco

6.1 Tecomat a Tecoreg

Systémy TECOMAT a TECOREG vyrábí česká firma Teco, a. s. se sídlem v Kolíně. Produkty firmy Teco jsou vysoce modulární a cenově příznivé. Modularita umožňuje zkombinovat vstupní, výstupní i řídicí moduly přímo pro danou soustavu a sestavit tak automat přesně podle potřeby. Výrobky firmy Teco, a. s. patří do světově uznávané kategorie programovatelných automatů (podle IEC 1131) a používají se v celém světě, což značí vysokou kvalitu. Navíc má firma Teco vlastní vývojovou a výrobní základnu a zastoupení i v zahraničí (Slovensko, Polsko, Německo a Rusko).

Systémy Tecomat jsou programovatelné automaty určené pro řízení strojních technologií, výrobních linek, dopravních systémů nebo pro regulaci rozsáhlých tepelných systémů. Systémy Tecoreg jsou programovatelné regulátory určené pro lokální regulaci i distribuované řízení menších a středních tepelných systémů a budov. Mimo Tecomatů a Tecoregů nabízí firma Teco i systémy TECOMAX, které jsou určeny ke sledování a regulaci odběru elektrické energie.

Tecomat a Tecoreg jsou PLC (Program Logic Controller) automaty použitelné k řízení strojů i průmyslových procesů. Automat je s řízenou soustavou spojen přes analogové a digitální vstupy/výstupy. Jejich prostřednictvím získává informace o řízené soustavě nebo ji řídí. Algoritmy řízení jsou uloženy v uživatelské paměti automatu. Mimo instrukcí zapsaných v uživatelské paměti provádí základní jednotka ještě režijní operace, a to při každém cyklu PLC (obr. 6.1).

Během části cyklu čtení (obr. 6.1 – čtení vstupů do paměti PLC) se načítají vstupní proměnné, to zamezuje možnosti vzniku hazardních stavů, protože při běhu uživatelského programu nemůže dojít k jejich změně. Hodnoty načtené ze vstupů se ukládají do vstupní části zápisníkové paměti PLC (viz tabulka 6.1).

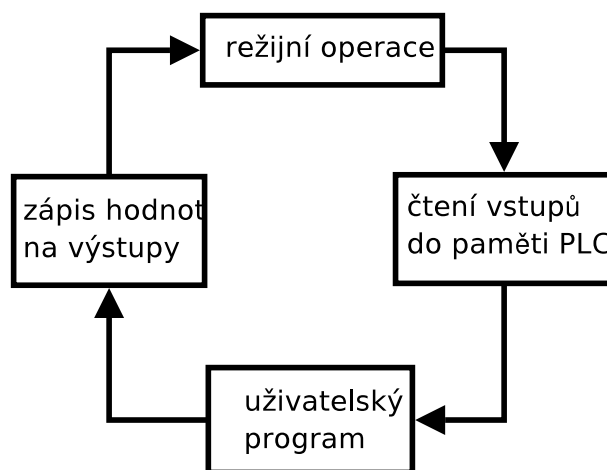
V další části cyklu se instrukci po instrukci provádí vlastní uživatelský program. Systémová jednotka čte z uživatelské paměti postupně instrukce a vykonává je. Hodnoty ze vstupů se v této části cyklu již nenačítají, používají se vstupní hodnoty ze zápisníkové paměti načtené v předchozí části cyklu. Veškeré hodnoty určené pro výstup se zapisují do výstupní části zápisníkové paměti.

Po skončení uživatelského programu následuje třetí část cyklu, tou je aktualizace výstupních proměnných (obr. 6.1 – zápis hodnot na výstupy). V této části se z ob-

X - oblast vstupů	X_0	...	X_{127}
Y - oblast výstupů	Y_0	...	Y_{127}
S - systémová oblast	S_0	...	S_{63}
R - uživatelská oblast	R_0	...	R_{8191}

Tabulka 6.1: Struktura zásobníkové paměti s rozsahy

lasti výstupu zápisníkové paměti zapíše hodnoty vypočtené za běhu programu na fyzické výstupy automatu. Bezchybnou činnost hlídá operační systém automatu, který provádí



Obrázek 6.1: Programový cyklus PLC

režijní operace pro přípravu na další cyklus. Obsahuje také tzv. watchdog, jenž hlídá čas průchodu jednoho cyklu, a tím provádí detekci nekonečných smyček v programu. Oblast vstupů zápisníkové paměti, jak bylo již popsáno, obsahuje načtené obrazy vstupů. Stejně tak oblast výstupů obsahuje obrazy hodnot výstupních signálů. V systémové oblasti zásobníkové paměti se nacházejí systémové registry automatu (přehled systémových registrů viz [11, 12]). Uživatelská oblast slouží k tomu, aby si programátor mohl vytvořit pomocné proměnné.

Automat se může nacházet ve dvou základních režimech. Jsou to režim RUN a HALT. V režimu RUN se provádí načítání hodnot ze vstupních jednotek, uživatelský program a zápis vypočtených hodnot do výstupních jednotek. HALT režim je určen především k programování automatu. Program se v tomto režimu nevykonává a automat nekomunikuje s řízenou soustavou. Z toho důvodu se při závažné chybě než automat přejde do režimu HALT provede systémová jednotka ošetření chyby z hlediska bezpečnosti řízení. To je velmi důležité, neboť by mohlo dojít k nedozírným škodám.

Komunikace

Automat je schopen komunikovat s PC, ale i s jiným automatem. Počítač může být použit k monitorování řízeného procesu a být umístěn třeba ve vzdáleném velínu. Ke komunikaci s PC slouží sériové rozhraní RS-232 nebo USB. Pro zadání uživatelského programu se používá RS-232 a pro nahrání, nebo úpravu operačního systému automatu je základní jednotka vybavena zmíněným rozhraním USB. Automaty disponují také rozhraním *Ethernet*, které umožňuje současně provozovat až čtyři logická spojení. Přes rozhraní Ethernet je možné připojit automat k Internetu a ovládat jej i na velmi velkou vzdálenost (např. vizualizace). Pro komunikaci s ostatními automaty jsou podporovány i rozhraní RS-485 nebo průmyslové sběrnice MODBUS, PROFIBUS, CANopen.

Celý systém Tecomat může komunikovat také prostřednictvím modulu GSM, radio-modemu, optomodemu nebo telefonního modemu. Může být tedy umístěn decentralizovaně tak, že výkonné části jsou přímo u řízené technologie a řídicí jednotka může být i velmi daleko. Při takto realizovaném systému jsou jeho části mnohdy schopny pracovat autonomně i při výpadku centra. Navíc lze tento systém snadno modifikovat, doplňovat a kontrolovat.

6.2 Mosaic

Vývojové prostředí MOSAIC bylo vytvořeno k uživatelsky pohodlnému vývoji programů pro automaty od společnosti TECO. Pracuje pod operačními systémy Windows. Obsahuje simulátor s možností online i offline ladění.

Součástí programovacího prostředí je i konfigurační nástroj, který je potřeba již při samém počátku vývoje programu. S jeho pomocí nadefinujeme buďto typ kompaktního automatu, nebo moduly a jejich adresy automatu rozšiřitelného, které jsou připojeny.

Konfiguraci systému můžeme provést ručně nebo u novějších automatů automaticky. Ruční konfiguraci provádíme pokud nemáme dané moduly při vývoji programu k dispozici, ale chceme je v projektu použít. Tedy když nemáme možnost testovat program na fyzickém zařízení a používáme simulátor.

Automatickou konfiguraci provedeme, jsme-li připojeni k fyzickému automatu a jsme-li schopni s ním komunikovat. Konfigurační nástroj načte údaje z centrální jednotky a vygeneruje seznam nalezených modulů. Takto získanou konfiguraci je možné ručně kdykoliv pozměnit.

Program Mosaic využívá k programování PLC automatu jazyk instrukcí, které jsou součástí instrukčního souboru automatu Teco. Vlastní překlad programu se provádí překladačem xPRO. Symbolická jména proměnných nesmí začínat číslem nebo písmenem s diakritikou a nesmí být totožné s vyhrazenými symboly překladače. Malá a velká písmena se nerozlišují, překladač všechna převádí na velká. Komentář je uvozen středníkem a vše za ním až do konce řádky překladač ignoruje.

Mezi nejpoužívanější instrukce instrukčního souboru automatu patří:

- instrukce pro čtení a zápis
- instrukce logických operací
- aritmetické instrukce

- skoky
- instrukce PID

Máme také možnost naprogramovat si své vlastní instrukce. K tomu je potřeba ovládat jazyk C. Při použití vlastních instrukcí je důležité dbát na to, aby nebyly používány na procesoru, pro který nebyly napsány.

Instrukční soubor základní jednotky obsahuje mnoho dalších instrukcí, viz [11, 12].

Kromě instrukcí můžeme využívat pomocné grafické nástroje a různá zjednodušení dostupná ve formě softwarových modulů. Tyto moduly je možné snadno přidat do prostředí Mosaic. Programy v prostředí Mosaic lze psát přímo zápisem instrukcí. Máme-li nainstalovaný příslušný modul, můžeme přepnout prostředí do tzv. reléového zápisu programu. Jedná se o grafické zobrazení již napsaného programu, které je přehlednější pro hledání chyb a testování. Dalšími nástroji, které jsou ve formě softwarových modulů dostupné v prostředí Mosaic jsou PID maker a Graph maker. Najdeme je na horním panelu pod ikonami.

Kapitola 7

Měření na rodinném domku

Ke svému měření jsem si vybral rodinný jednopatrový domek z 50. let. Jedná se tedy o poměrně starý dům po rekonstrukci. Rekonstrukce zahrnovala výměnu oken za plastová okna s dvojitým sklem a vakuovou izolací, výměnu dveří, zpevnění zdiva a instalace zateplující izolace.

Domy tohoto typu se vyznačují svými lepšími vlastnostmi co se týče tepelné kapacity. Za horkých letních dnů bývají dlouho příjemně chladnými. Jejich teplota roste hlavně díky ohřevu z venku od slunce a zevniř díky osobám obývajícím dané prostory. Při dodržování jednoduchých pravidel lze v takovýchto domech minimalizovat nároky na klimatizaci.

Naopak v zimě je náročné dům vytopit. Trvá poměrně dlouho, a spotřebuje se dost energie, než se podaří dům natopit na požadovanou teplotu, ale pak díky své tepelné kapacitě dům vydrží nějakou dobu vytopený. To je způsobeno vlhkostí a jeho tlustými zdmi.

Měření v domě jsem rozdělil do dvou částí

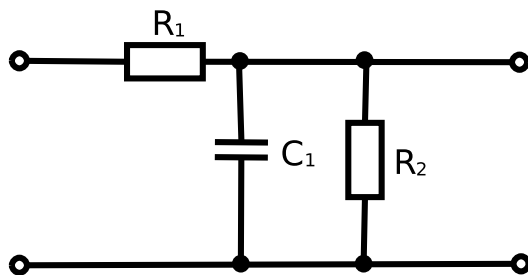
- měření za normalních podmínek a
- měření s poruchami

K měření veškerých teplot jsou využita zmíněná odporová čidla PT100.

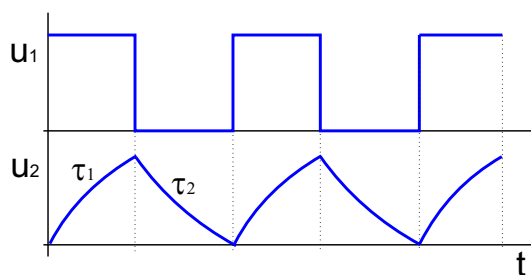
7.1 Očekávané výsledky měření

Chování tepelné soustavy lze poměrně dobře přirovnat k elektrickému systému, konkrétně integračnímu článku obr. 7.1. Na vstup připínáme topný výkon podle průběhu u_1 na obrázku 7.2. Z průběhu u_2 v témže obrázku, který znázorňuje průběh na odporu R_2 , je vidět postupné natápění s časovou konstantou $\tau_1 = R_1 C_1$, po odepnutí topení respektive zdroje sledujeme klesající průběh. Místnost je natopena, kondenzátor je nabit a vybíjí se s časovou konstantou $\tau_2 = C_1 R_2$. Stejně tak v tepelném systému, teplo se ztrácí například stěnami.

Na obrázku 7.3 je vidět průběh teploty v místnosti, kde je použit dvoustavový regulátor s hysterezí. Průběh je poněkud idealizovaný, protože jsou zanedbána zpoždění a setrvačnosti. Horní mez T_2 je na regulátoru nastavena jako vypínací, dolní mez T_1 naopak určuje, kdy se topení zapne. Zapínací a vypínací meze se obvykle volí tak, aby žádaná

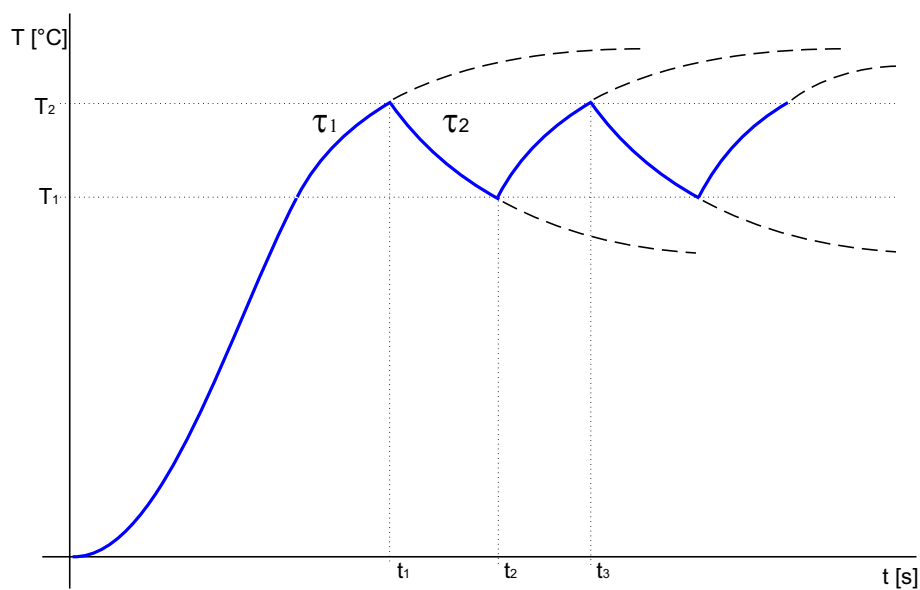


Obrázek 7.1: Integrační článek



Obrázek 7.2: Průběhy na integračním článku

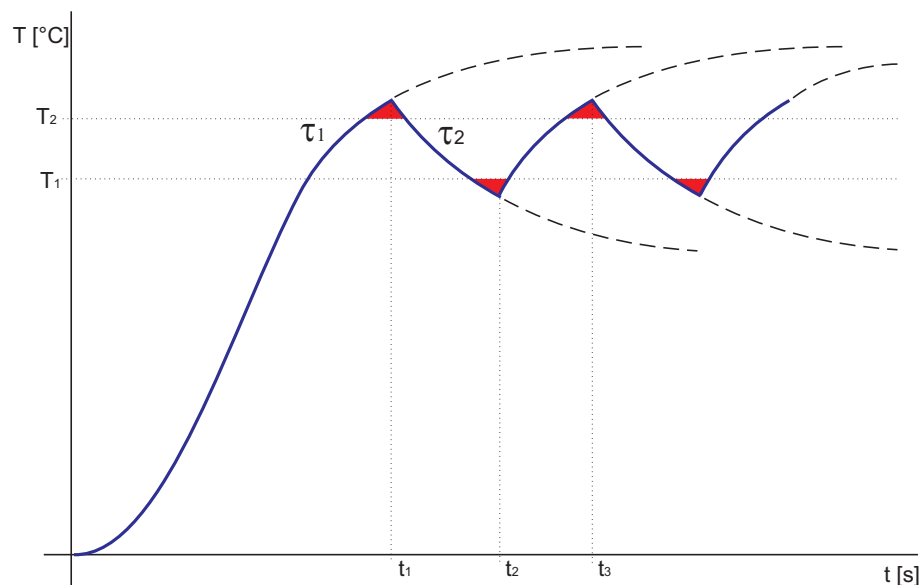
teplota ležela někde mezi nimi. Takto zvolenými mezemi se totiž sníží opotřebení akčních a spínacích členů. Například stykače nespínají tak často, takže ani nedochází k častým proudovým výkyvům a ke vzniku elektromagnetického rušení.



Obrázek 7.3: Ideální průběh teploty v místnosti

Reálné chování místnosti s regulací teploty je poněkud odlišné od výše zmíněného. Jak již bylo řečeno, je třeba brát v úvahu zpoždění a setrvačnosti topného systému. Topnému tělesu potrvá nějaký čas od doby zapnutí, než se zahřeje, tedy i než bude mít nějaký vliv na vytápěnou místnost. Od povelu vypnutí uplyne rovněž nějaký čas, než topné těleso skutečně přestane vydávat teplo. Jak je zřejmé z obrázku 7.4, teplota v místnosti mírně poroste i po dosažení vypínací teploty T_2 . Růst teploty se zastaví až po určité době dané zpožděním. Teprve v čase t_1 se přestane do místnosti dodávat teplo. Obdobně je tomu i při zapínání, po poklesu na zapínací teplotu T_1 se sice zapne přívod energie, ale teplota ještě neroste. Začíná růst až v čase t_2 . Teplota mezi tím nemusí nutně klesat jako je tomu na obrázku 7.4, kde je zobrazen extrém. Záleží to na izolaci místnosti, venkovních podmínkách a rychlosti ohřevu topného tělesa v místnosti.

V měřeném rodinném domku byly některé místnosti vytápěny starším typem liti-
nových nádrží s žebrováním. V závislosti na velikosti jejich plochy (počtu žeber) se po-
hybuje i doba chladnutí a doba roztápění. Moderní radiátory stejně jako přímotopy mají
tato zpoždění také, pouze mají jiné časy, u přímotopů je lze zanedbat.

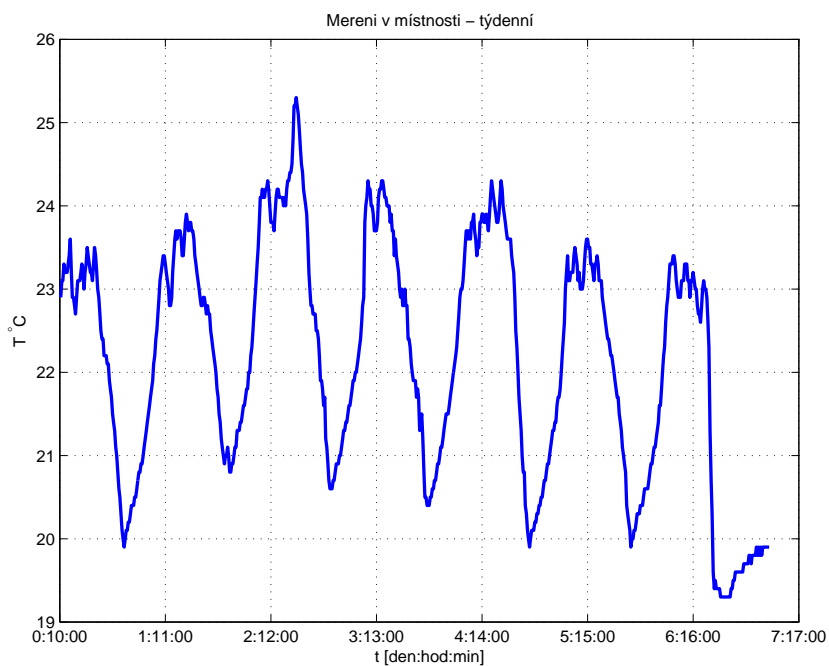


Obrázek 7.4: Reálný průběh teploty v místnosti

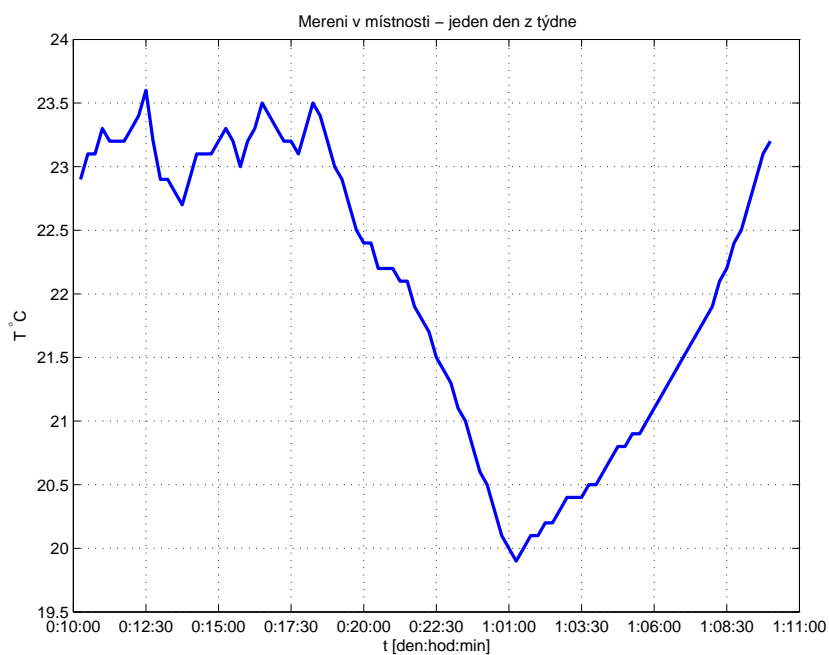
7.2 Měření za normálních podmínek

První způsob měření zahrnuje normální běh a život v domě a všechny chybové veličiny s tím související, např. otvírání oken i dveří, osoby v místnostech, vaření, tepelné ztráty různých spotřebičů. Měření probíhá prakticky neustále a ve všech místnostech. Z tohoto důvodu je měřicí interval poněkud delší (15min). Takto zvolená délka má i jiný důvod. Je jím podvzorkování, které má charakter dolní propusti, a tak graf netrpí šumem od emise tepla různých spotřebičů. Měří se též spotřeba teplé vody i energie spotřebovaná k topení a ohřevu vody.

Na obrázku 7.5 vidíme průběh změřený za celý týden v patnáctiminutových intervalech. Jedná se o měření, kdy provoz místnosti nebyl nijak omezen, místnost tedy žila normálním životem. Jemné zákmity na obrázku jsou způsobeny hysterezí regulátoru, velké propady teploty jsou úmyslné, děje se tak vždy ve večerních hodinách.



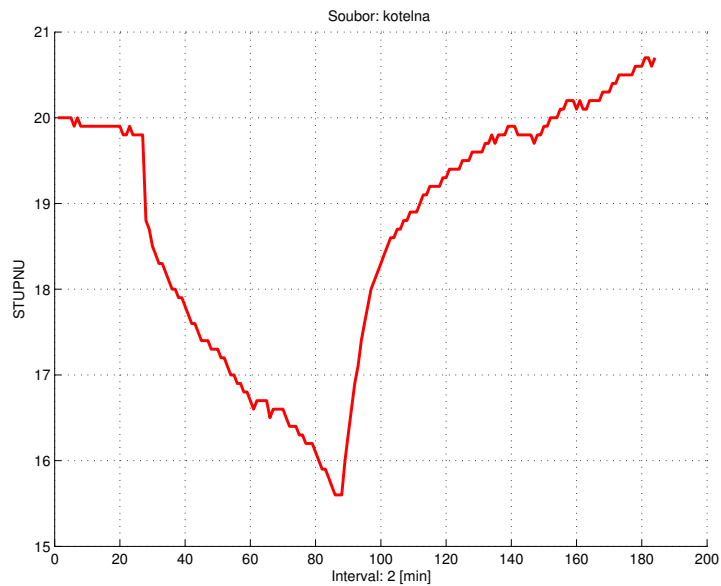
Obrázek 7.5: Týdení měření jedné místnosti



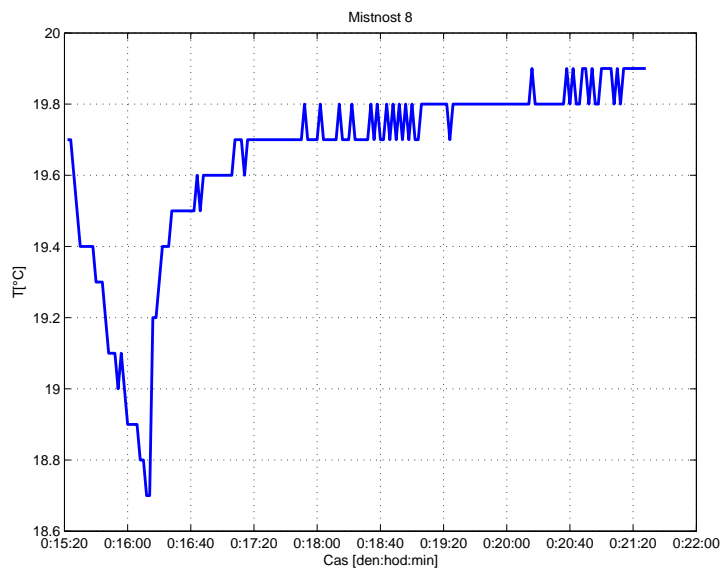
Obrázek 7.6: Den měření jedné místnosti (výřez z obr. 7.5)

7.3 Speciální měření

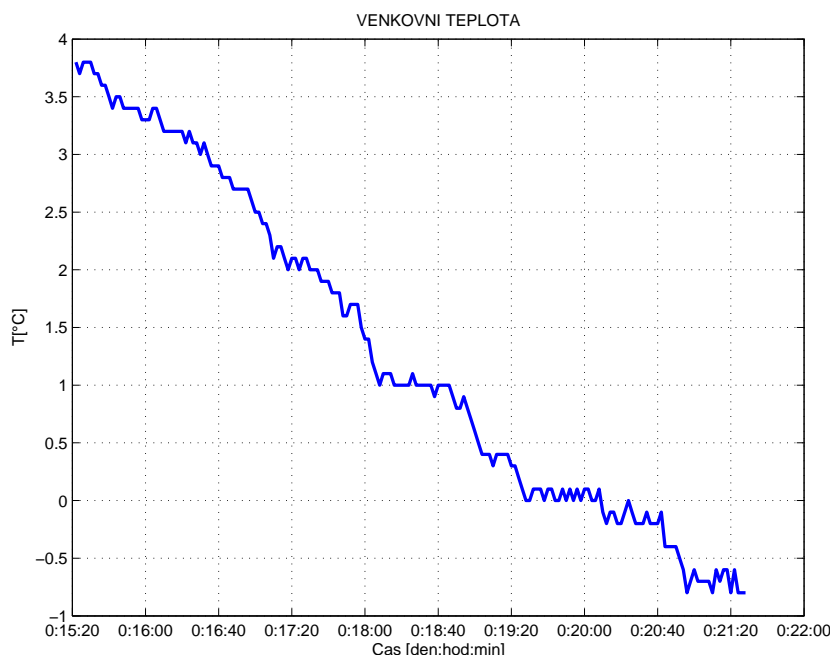
Druhý způsob měření jsem nazval speciální, protože jsem měřil postupně, v každé místnosti zvlášť. Navíc se od předchozího liší ještě tím, že je měřicí interval volitelně nastavitelný (většinou nastavuji na 2 min). Jednalo se převážně o měření přechodových charakteristik jednotlivých místností. Jelikož je každá místnost vybavena nezávislým regulačním okruhem s možností přepnutí na manuální ovládání, nebyl problém tyto charakteristiky změřit.



Obrázek 7.7: Přechodová charakteristika místnosti 1



Obrázek 7.8: Přechodová charakteristika místnosti 2



Obrázek 7.9: Venkovní teplota

Následující obrázek obr. 7.8 znázorňuje separátní měření přechodové charakteristiky v jedné místnosti. Nejdříve docházelo ke klimatizování způsobeném otevřením okna, tedy zásadní vliv má venkovní teplota, jejíž průběh je pro úplnost znázorněn na obr. 7.9. Zlom v charakteristice znamená, že se uzavřelo okno a začalo se naplno topit, ovšem pouze v této místnosti! Ostatní místnosti jsou z tohoto měření zcela vyjmuty. Tepelný prostup zkrz stěny je v tuto chvíli vzhledem k teplotám okolních místností zanedbatelný. Na obrázku se vyskytují zákmity $+0.1$ a -0.1 , to je způsobeno, jak již bylo zmíněno výše, chybou - rozlišením měřícího senzoru a též volbou měřícího intervalu.

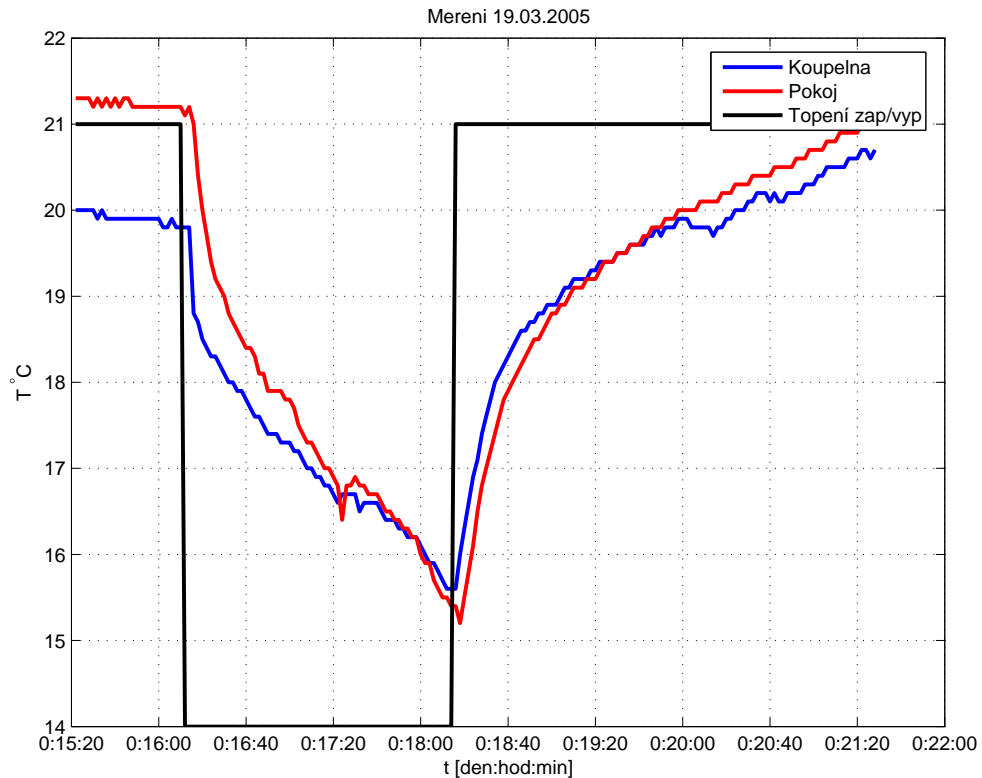
7.4 Vliv polohy místností

Vlivem polohy místností rozumíme například jejich umístění vzhledem k světovým stranám i vzhledem k ostatním místnostem v domě. Jde tedy i o to, kolik má daný pokoj sousedících pokojů, zda je rohový a není-li mezi nimi příliš vysoký teplotní rozdíl. Při projektování budov a návrhu jejich topných systémů se vlivy polohy místností kompenzují. Jedná se například o zvýšení výkonu topných těles v severních místnostech nebo místnostech na návětrných stranách. Tyto okolnosti se projeví nižší teplotou venkovních zdí.

Aby bylo možné zjistit jak velký má vliv poloha, provedl jsem několik měření současně, tím jsem vyloučil vliv venkovní teploty. Těžko by bylo možné zajistit, aby se průběhy venkovní teploty shodovaly při měření po několik dnů.

Na obr. 7.10 můžeme pozorovat a srovnávat měření dvou sousedících prostor. Měření probíhalo současně, tedy za stejného průběhu venkovní teploty. Z grafů je patrné, že jejich časové konstanty budou podobné. Pokud ale budeme chtít vyvozovat závěry ohledně po-

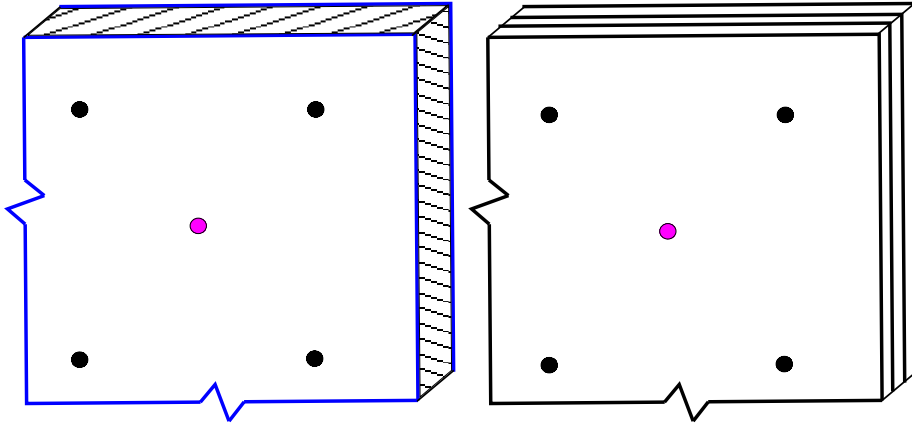
lohy a světových stran, je potřeba brát v potaz jejich velikost, objem ohřívajícího vzduchu a topný výkon. Jelikož jedna z měřených místností je obytná, bude zřejmě o něco větší a topné těleso v ní bude mít větší výkon. Z grafu není problém poznat o kterou křivku se jedná.



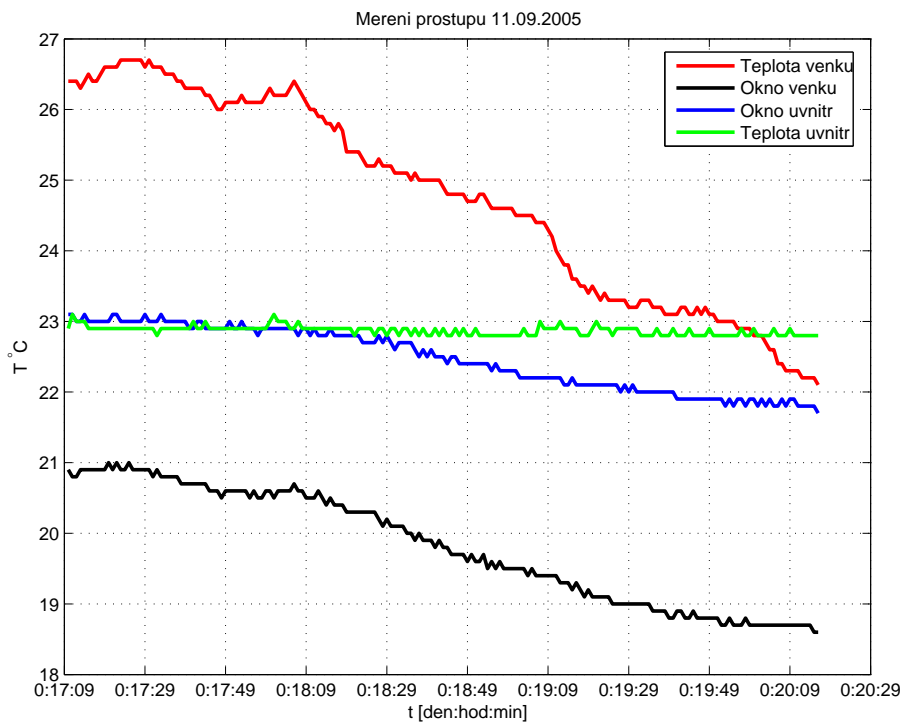
Obrázek 7.10: Přejchodové charakteristiky sousedících místností

7.5 Měření ztrát okny a zdmi

Způsob měření úniku tepla okny a zdmi je zakreslen na obrázku 7.12, kde černé body reprezentují místa, kde měly být původně umístěny senzory PT100 a červené body jsou místa, kde byly skutečně umístěny. K tomuto řešení jsem se přiklonil po ohledání rozložení teplot ručním bezdotykovým měřidlem. Dospěl jsem k závěru, že rozložení teplot na skle respektive zdi je rovnoměrné, lze tedy použít místo čtyř senzorů jeden z každé strany okna respektive zdi. Změřené hodnoty jsou na přiloženém CD, zde uvádím jen vybraný graf.



Obrázek 7.11: Měření na okně a zdi



Obrázek 7.12: Příklad měření na okně

Kapitola 8

Model

V této kapitole vytvoříme model. Model popisuje chování teploty místnosti v závislosti na venkovní teplotě, teplotě okolních místností a vnějších vlivů, například slunce. V první části této kapitoly budu uvažovat místnost bez vytápění a sledovat růst a pokles teploty na základě tepla prostupujícího zdmi místnosti. Model bude tedy obsahovat pouze jeden vstup, a sice venkovní teplotu. Z modelu odhadnu předpokládaný průběh teploty a srovnám se skutečným průběhem. V druhé části bude vytvořen stavový model místnosti, ve kterém budeme uvažovat i tepelně akumuláční vlastnosti a tepelnou energii dodávanou ze zdroje.

8.1 Matematický model prostupu tepla

V tomto případě budeme z ilustračních důvodů uvažovat pouze prostupnost a tepelné akumuláční vlastnosti budeme zanedbávat. Jedná se vlastně o výpočet přírůstku nebo ztrát tepla jedné místnosti vzhledem k okolí.

Za vztahu (2.11) pro tepelný tok v kapitole o tepelné vodivosti (2.2) vyjádříme teplo, které projde plochou S za čas t při tepelném toku q .

$$Q = qSt \tag{8.1}$$

Tepelný tok stěnou dosadíme ze vztahu (3.7) z kapitoly o tepelné prostupnosti. Konstantu K spočteme pro každou stěnu místnosti zvlášť a stejně tak i podíly tepla.

Vztah pro teplo dodané jednou stěnou bude potom

$$Q = (T_u - T_s) \left(\frac{2}{\alpha} + \frac{a_1}{\lambda_1} + \frac{a_2}{\lambda_2} \right)^{-1} S t = K(T_u - T_s) S t, \tag{8.2}$$

kde T_u je teplota uvnitř zkoumané místnosti, T_s je teplota za zdí ve vedlejší místnosti, koeficienty λ_1, λ_2 jsou součinitelé tepelné vodivosti materiálů stěny a a_1, a_2 jejich tloušťky. Koeficienty α reprezentují součinitele přestupu tepla.

Obě teploty jsou funkcemi času a při každém měření nabývají různých hodnot. Algoritmus pro výpočet se bude skládat z n kroků, kde n je počet měření.

$$\begin{aligned}
1. \text{ krok } Q(1) &= KS(T_1(0) - T_2(0)) \\
T_1(2) &= \frac{Q(1)}{\rho c} + T_2(1) \\
2. \text{ krok } Q(2) &= KS(T_1(1) - T_2(1)) \\
T_1(3) &= \frac{Q(2)}{\rho c} + T_2(2) \\
&\vdots \\
&\vdots \\
&\vdots \\
n. \text{ krok } Q(t) &= KS(T_1(t-1) - T_2(t-1)) \\
T_1(t+1) &= \frac{Q(t)}{\rho c} + T_2(t)
\end{aligned}$$

Teplu se odebírá z místnosti s vyšší teplotou, dokud se teploty nevyrovnají. Vzhledem k tomu bude celkové teplo od všech stěn v každém kroku dáno vztahem

$$Q(t) = -K_1 S_1 (T_1(t-1) - T_2(t-1)) \cdots - K_6 S_6 (T_1(t-1) - T_7(t-1)), \quad (8.3)$$

tedy

$$Q = -Q_1 \cdots - Q_6. \quad (8.4)$$

V ploše S je vždy respektováno okno, pro které je proveden výpočet se zvláštní hodnotou K . Stejně tak každý druh zdi má svou vlastní konstantu K .

Hustota vzduchu v místnosti ρ je korigována vztahem pro závislost hustoty vzduchu na teplotě

$$\rho = \frac{\rho_0}{1 + \gamma T} \frac{p_0}{p}, \quad (8.5)$$

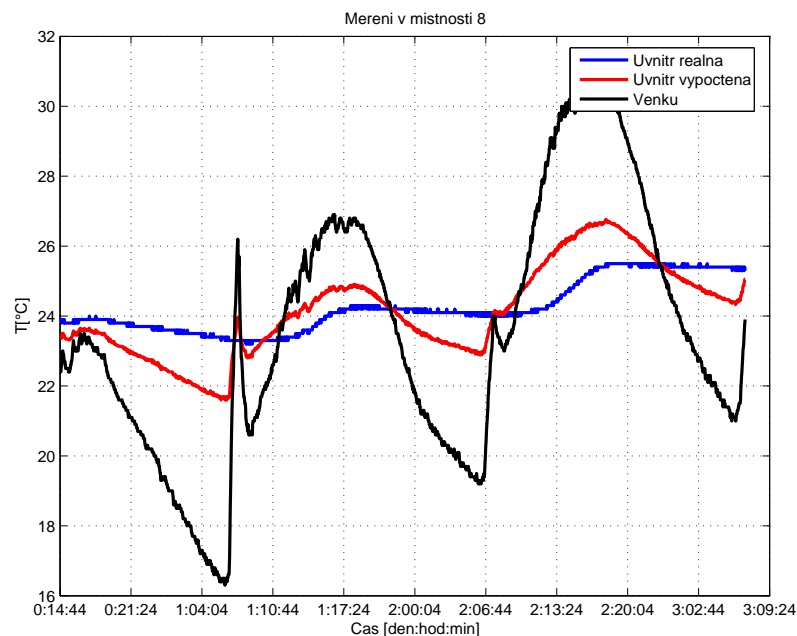
kde $\gamma = 0.00366 [K^{-1}]$ je konstanta závislosti hustoty vzduchu na teplotě, p a p_0 je tlak vzduchu a ρ a ρ_0 je hustota vzduchu. Přitom hodnoty veličin s indexem 0, p_0 a ρ_0 jsou konstanty. $p_0 = 100 \text{ kPa}$ a $\rho_0 = 1.276 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Jak jsme již vysvětlili v kapitole o termodynamice, nedopustíme se významné chyby.

Na konci každého kroku se provádí odhad budoucí teploty v místnosti na základě vlivu okolních místností. Správnost tohoto odhadu můžeme posoudit z obrázků 8.1 a 8.2.

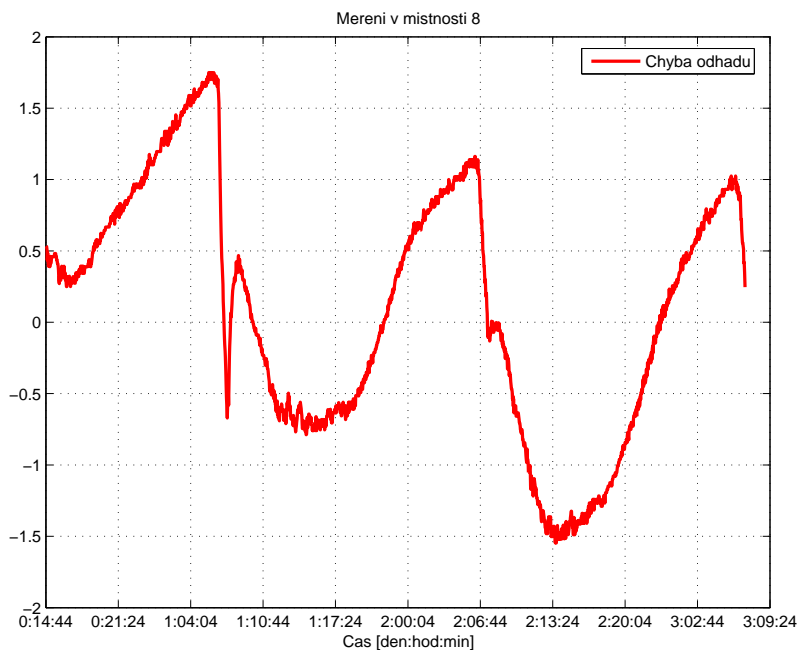
Na obrázcích vidíme třídní měření v intervalu 2 minut. Jedná se o místnost přes den vystavenou slunečnímu záření, situovanou na jižní straně budovy. Zvýšená chyba výpočtu ve večerních hodinách je způsobena lidskou přítomností a běhu elektrického spotřebiče.

Na témže obrázku 8.1 nás jistě zaujme skok venkovní teploty. Na první pohled se může zdát, že jde o chybu vzniklou vlivem rušení, ale podíváme-li se na obrázek 8.3, uvidíme, že kritických vzorků je několik. Nejedná se přímo o chybu měření, naměřené hodnoty jsou zcela správné. Tato anomálie, vyskytující se okolo sedmé hodiny ranní, je systematickou chybou. Prozkoumáním několika dalších měření venkovní teploty, jsem zjistil, že se okamžik výskytu mění, posouvá se. Potom už nebylo těžké vysledovat, že se posouvá podle dne v roce. Z toho vyplývá, že ho musí v danou dobu ohřívat sluneční svit, ale jen na malý okamžik. Senzor venkovní teploty se nachází ve stínu, ale jak je zřejmé

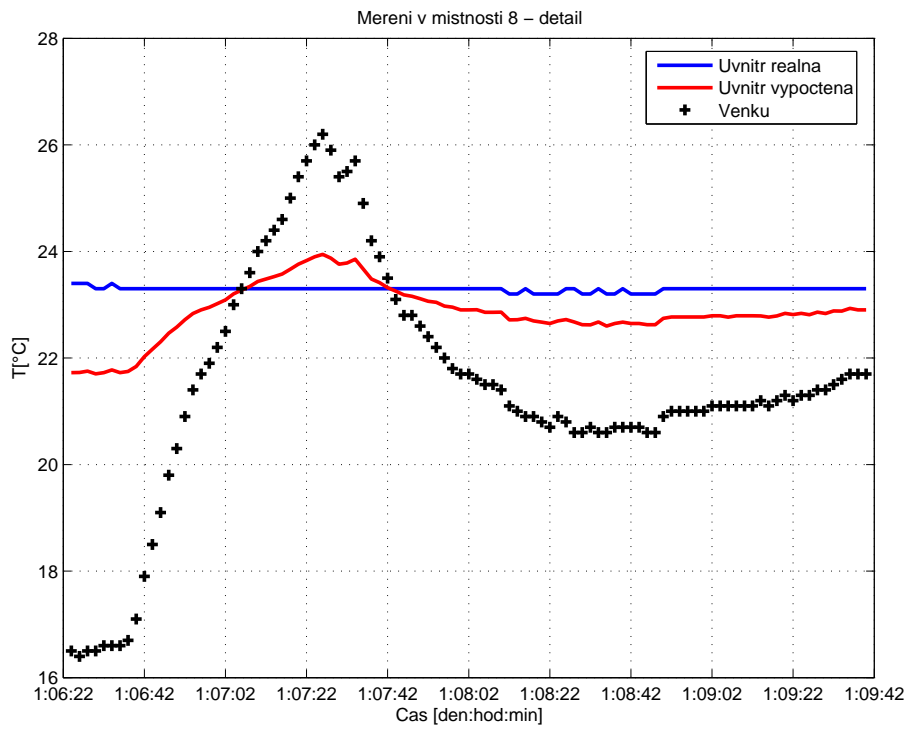
z měření, musí na něj svítit slunce. Dochází k tomu díky malému průhledu v korunách stromů, kterého si jinak není možné všimnout. Jedná se o typickou poruchovou veličinu těchto systémů, které je možné předejít vhodným umístěním senzoru.



Obrázek 8.1: Srovnání výpočtu se skutečným průběhem



Obrázek 8.2: Odchylka vypočteného průběhu

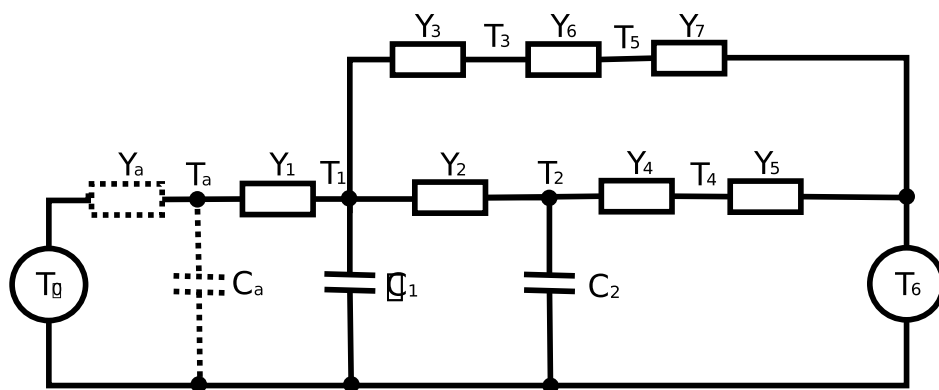


Obrázek 8.3: Detail průběhu z obr.8.1

8.2 Model chování místnosti

Místnost z našeho pohledu budeme modelovat jako systém s dvěma časovými konstantami. Jedna časová konstanta bude reprezentovat tepelnou kapacitu vzduchu v místnosti a druhá časová konstanta bude reprezentovat tepelnou kapacitu zdí. Do modelu je možné zahrnout i tepelnou kapacitu vody, její vodivost a dopravní zpoždění (na obrázku označeno indexy a).

Tyto dvě konstanty určíme snadno z změření. Naš systém si můžeme rozkreslit jako elektrický obvod obr. 8.4. Teplota je v našem případě ekvivalentem napětí v elektrickém obvodu, tepelnou vodivost i tepelnou kapacitu lze zaměnit za elektrickou. V obrázku jsou



Obrázek 8.4: Elektrické schéma tepelných vlastností modelované místnosti

pro názornost použity popisy přímo pro tepelný systém podle vztahu ekvivalence, který je zmíněn výše. Popisky v obrázku tedy jsou

T_0 je teplota topné vody

T_1 je teplota v místnosti,

T_2 je teplota zdí uvnitř místnosti,

T_3 je teplota okna (skla) uvnitř místnosti,

T_4 je teplota zdí vně místnosti,

T_5 je teplota oken vně místnosti,

T_6 je venkovní teplota,

Y_1 je tepelná vodivost mezi topnou vodou a vzduchem v místnosti,

Y_2 charakterizuje přestup vzduch - zeď uvnitř místnosti,

Y_3 charakterizuje přestup vzduch - okno uvnitř místnosti,

Y_4 je tepelná vodivost zdi,

Y_5 charakterizuje přestup vzduch - zeď vně místnosti,

Y_6 je tepelná vodivost skla,

Y_7 charakterizuje přestup vzduch - okno vně místnosti,

Y_a je tepelná vodivost topné vody,

C_1 je tepelná kapacita vzduchu v místnosti,

C_2 je tepelná kapacita zdiva,

C_a je tepelná kapacita topné vody.

Jelikož jsme náš systém překreslili jako elektrický obvod, můžeme využít zákonitostí a vztahů platících pro elektrické obvody. Pro sestavení diferenciálních rovnic použijeme metodu uzlových napětí. Nebudu zde zmiňovat postup, omezím se na rovnice plynoucí z obvodu, které dále upravím pro naše potřeby.

Použitím metody uzlových napětí dostaneme tyto rovnice

$$\begin{aligned} (T_1 - T_0) Y_1 + (T_1 - T_6) Y_{367} + (T_1 - T_2) Y_2 + C_1 \frac{dT_1}{dt} &= 0, \\ (T_2 - T_1) Y_2 + (T_2 - T_6) Y_{45} + C_2 \frac{dT_2}{dt} &= 0, \end{aligned} \quad (8.6)$$

kde vodivosti Y_3 , Y_6 a Y_7 byly sloučeny pro jednoduchost do jedné vodivosti Y_{367} , stejně tak i vodivosti Y_4 a Y_5 do Y_{45} . Výsledná vodivost sériově řazených vodivostí je dána převrácenou hodnotou součtu převrácených hodnot jednotlivých vodivostí, stejně jako pro paralelní řazení rezistorů. V našem případě jde pro tepelné vodivosti a prostupy, jak je vidět ze vztahu (3.7) v kapitole o tepelné prostupnosti (3), o stejný princip.

Po úpravě rovnic dostaneme

$$\begin{aligned} T_0 \frac{Y_1}{C_1} - T_2 \frac{Y_1 + Y_{367} + Y_2}{C_1} + T_2 \frac{Y_2}{C_1} + T_6 \frac{Y_{367}}{C_1} &= \frac{dT_1}{dt}, \\ T_1 \frac{Y_2}{C_2} - T_2 \frac{Y_2 + Y_{45}}{C_2} + T_6 \frac{Y_{45}}{C_2} &= \frac{dT_2}{dt}. \end{aligned} \quad (8.7)$$

Z předchozích rovnic vypočteme matice pro stavový popis systému. Stavový popis pro spojitý systém vypadá následovně

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{A} \mathbf{x}(t) + \mathbf{B} \mathbf{u}(t), \\ \mathbf{y}(t) &= \mathbf{C} \mathbf{x}(t) + \mathbf{D} \mathbf{u}(t), \end{aligned} \quad (8.8)$$

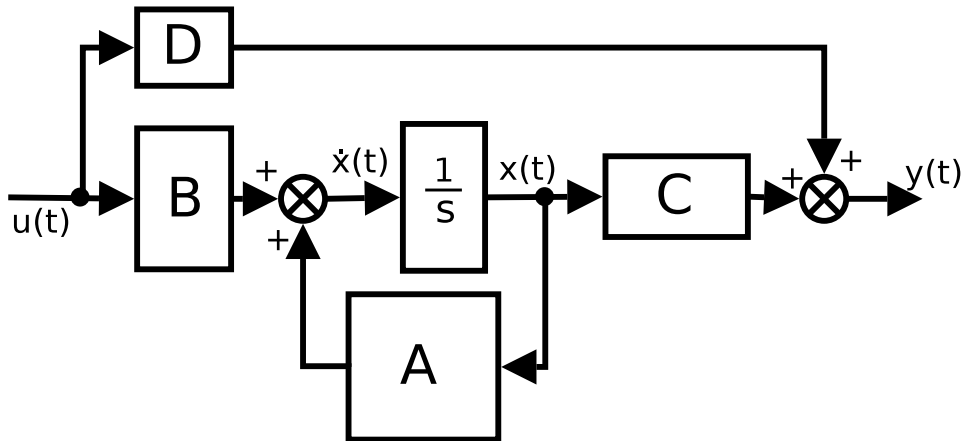
kde

\mathbf{A} je matice systému rozměru $(n \times n)$,
 \mathbf{B} je matice řízení rozměru $(n \times r)$,
 \mathbf{C} a \mathbf{D} jsou matice výstupní rozměru $(m \times n)$ a $(m \times r)$.

Jak je z diferenciálních rovnic zřejmé, bude se jednat o systém druhého řádu, se dvěma vstupy T_0 , T_6 a jedním výstupem T_1 .

Pro náš model jedné místnosti budou stavové rovnice

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{T}_1 \\ \dot{T}_2 \end{bmatrix} &= \mathbf{A} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{bmatrix} + \mathbf{B} \begin{bmatrix} T_0 \\ T_6 \end{bmatrix} \text{ a} \\ [T_1] &= \mathbf{C} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{bmatrix} + \mathbf{D} \begin{bmatrix} T_0 \\ T_6 \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (8.9)$$



Obrázek 8.5: Blokové schéma stavového modelu

kde

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{Y_1 + Y_{367} + Y_2}{C_1} & \frac{Y_2}{C_1} \\ \frac{Y_2}{C_2} & -\frac{Y_2 + Y_{45}}{C_2} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{Y_1}{C_1} & \frac{Y_{367}}{C_1} \\ 0 & \frac{Y_{45}}{C_2} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C} = [1 \ 0], \quad \mathbf{D} = [0 \ 0].$$

Jednotlivé tepelné vodivosti určíme ze vztahu

$$Y_i = K S, \quad (8.10)$$

kde K je konstanta pro přestup tepla viz. 2.2 S je plocha uvažovaného rozhraní.

Výpočty tepelných kapacit provedeme podle vztahu

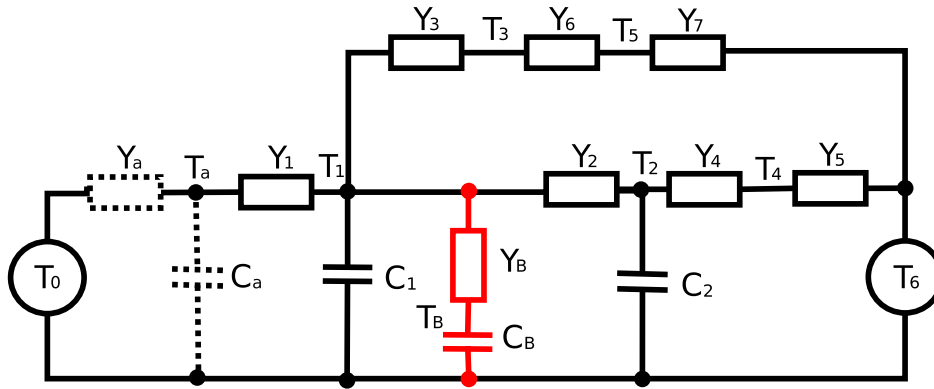
$$C_i = m c = \rho V_i c, \quad (8.11)$$

kde c je měrná tepelná kapacita, ρ je hustota a V objem.

Vypočtené tepelné kapacity a vodivosti pro jednotlivé místnosti zde nevyčísľují, protože jsou uloženy v datové struktuře na příloženém disku.

Na obrázku 8.6 vidíme model rošířený o vnitřní zdívo, od předchozího se liší stavem T_B , změnil se tedy řád systému. Stavové rovnice rozšířeného modelu dostaneme z rovnic předchozího modelu přičtením členu

$$(T_1 - T_B) Y_B$$



Obrázek 8.6: Schéma rozšířeného modelu

a dále přidáním třetí rovnice. Rovnice rozšířeného modelu bude tedy

$$\begin{aligned}
 T_0 \frac{Y_1}{C_1} - T_2 \frac{Y_1 + Y_{367} + Y_2 + Y_B}{C_1} + T_B \frac{Y_B}{C_1} + T_2 \frac{Y_2}{C_1} + T_6 \frac{Y_{367}}{C_1} &= \frac{dT_1}{dt}, \\
 T_1 \frac{Y_2}{C_2} - T_2 \frac{Y_2 + Y_{45}}{C_2} + T_6 \frac{Y_{45}}{C_2} &= \frac{dT_2}{dt} \\
 T_1 \frac{Y_B}{C_B} - T_B \frac{Y_B}{C_B} &= \frac{dT_B}{dt}.
 \end{aligned} \tag{8.12}$$

T_B je teplota vnitřních zdí,

Y_B je tepelná vodivost vnitřních zdí,

C_B je tepelná kapacita vnitřních zdí.

Odtud po úpravě dostaneme diferenciální rovnice

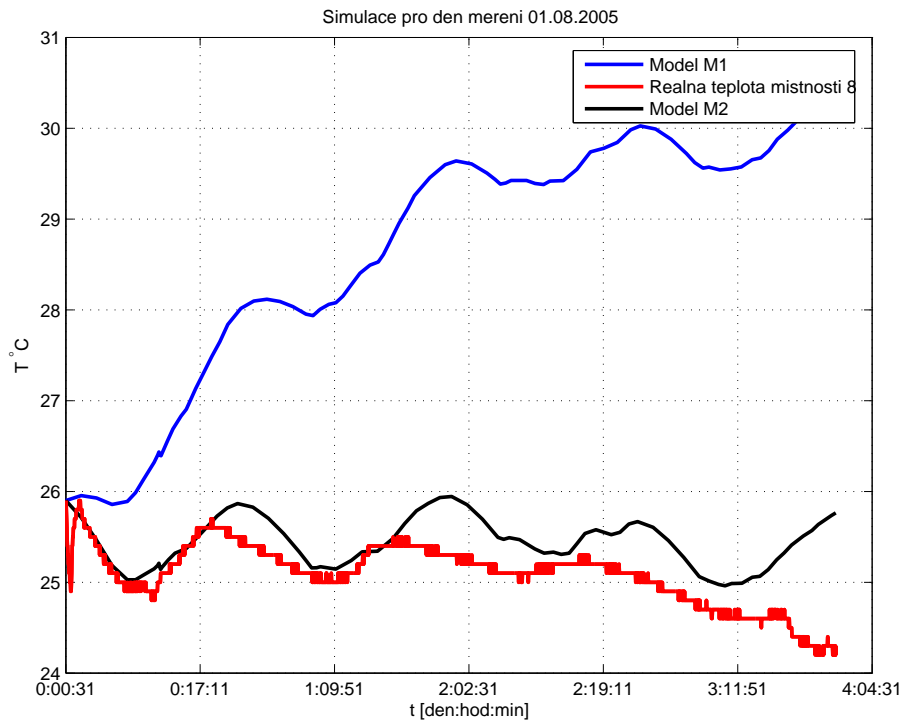
$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} \dot{T}_1 \\ \dot{T}_2 \\ \dot{T}_B \end{bmatrix} &= \mathbf{A} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_B \end{bmatrix} + \mathbf{B} \begin{bmatrix} T_0 \\ T_6 \end{bmatrix} \text{ a} \\
 [T_1] &= \mathbf{C} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_B \end{bmatrix} + \mathbf{D} \begin{bmatrix} T_0 \\ T_6 \end{bmatrix},
 \end{aligned} \tag{8.13}$$

kde

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{Y_1 + Y_{367} + Y_2 + Y_B}{C_1} & \frac{Y_2}{C_1} & \frac{Y_B}{C_1} \\ \frac{Y_2}{C_2} & -\frac{Y_2 + Y_{45}}{C_2} & 0 \\ \frac{Y_B}{C_B} & 0 & -\frac{Y_B}{C_B} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{Y_1}{C_1} & \frac{Y_{367}}{C_1} \\ 0 & \frac{Y_{45}}{C_2} \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

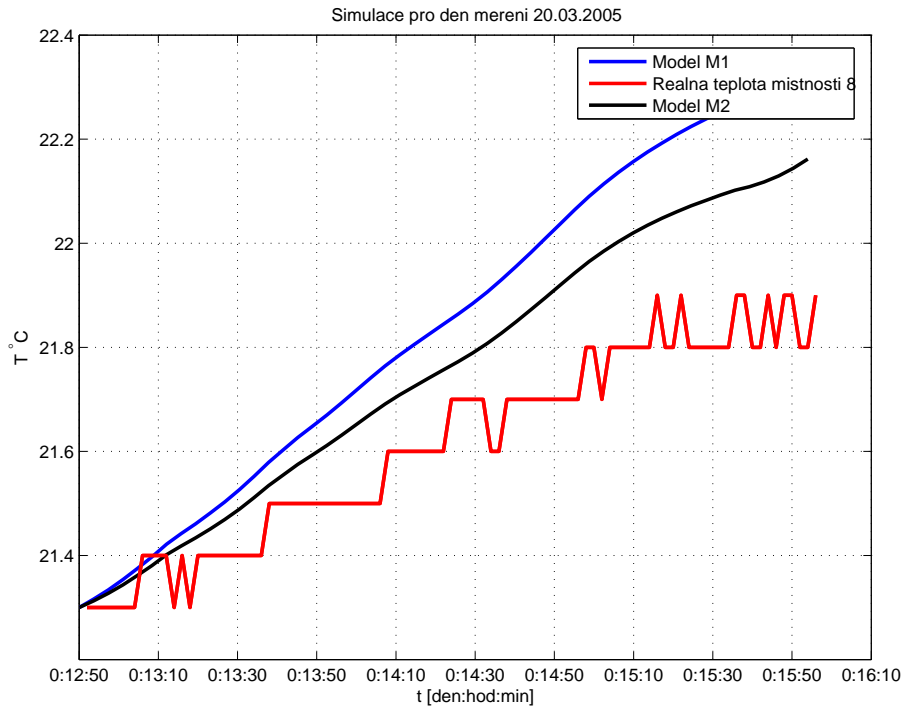
$$\mathbf{C} = [1 \ 0 \ 0], \quad \mathbf{D} = [0 \ 0].$$

Na obrázcích 8.7 a 8.8 vidíme srovnání prvního a druhého modelu. Je vidět, že přesnost modelu bude záviset na ročním období. Je vidět, že druhý model věrněji sleduje skutečný systém, to je způsobeno tím, že druhý model uvažuje ztráty způsobené prostupem tepla do sousedních místností. Z určitého pohledu se nejedná o ztráty, protože teplo, prostupující do sousedních místností, zůstává v budově. Z pohledu uvažované místnosti jde jednoznačně o ztráty.

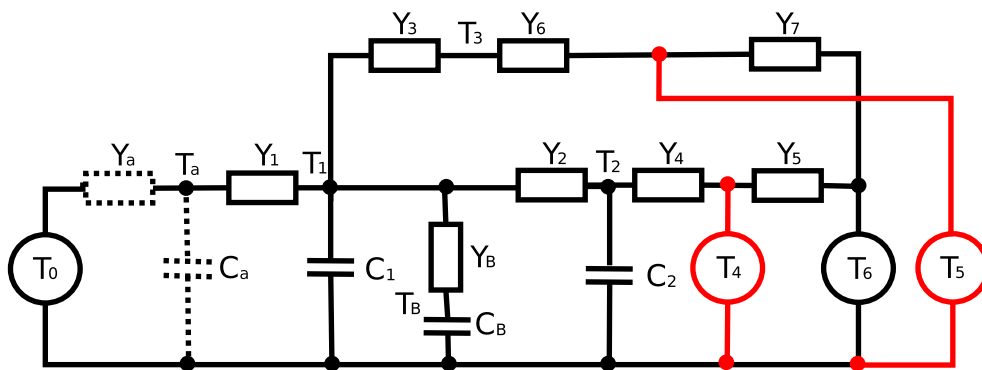


Obrázek 8.7: Srovnání modelů

Na obrázku 8.18 vidíme model obsahující vliv slunečního záření, větru a deště. Jedná se vlastně o důsledek těchto vlivů, protože je neměříme přímo, ale měříme jejich účinek. Do modelu jsem přidal stavy T_4 a T_5 . Jedná se o vnější teplotu zdiva a vnější teplotu oken, které jsou ovlivňovány zmíněnými venkovními vlivy. Tyto stavy známe, protože je měříme a jsou do modelu vneseny "z venku" viz 8.10. Proto bude mít matice \mathbf{A} poslední dva řádky nulové.



Obrázek 8.8: Srovnání modelů



Obrázek 8.9: Schéma rozšířeného modelu 2

$$\begin{bmatrix} \dot{T}_1 \\ \dot{T}_2 \\ \dot{T}_B \\ \dot{T}_4 \\ \dot{T}_5 \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_B \\ T_4 \\ T_5 \end{bmatrix} + \mathbf{B} \begin{bmatrix} T_0 \\ T_6 \end{bmatrix} \text{ a}$$

(8.14)

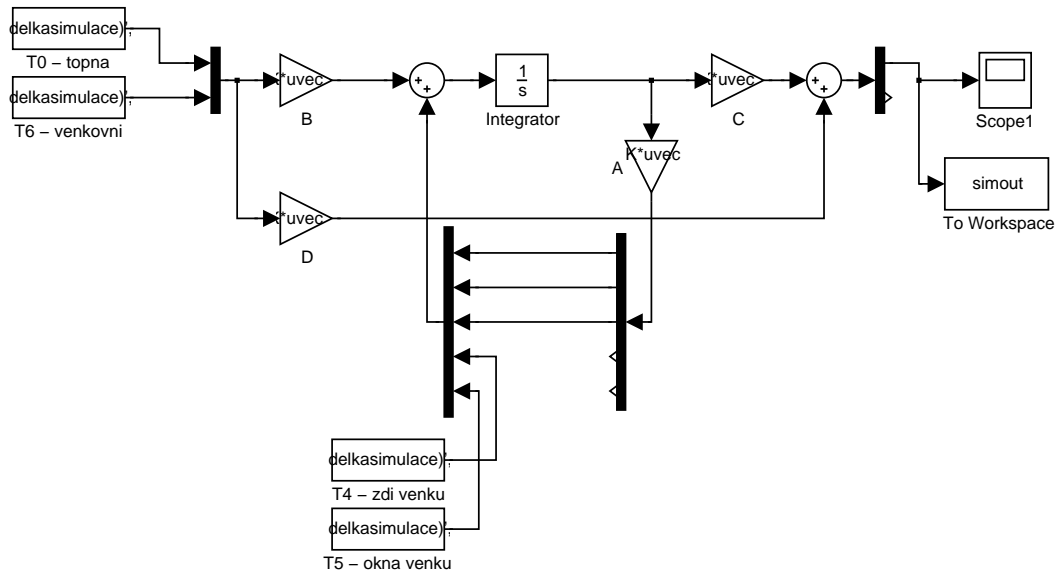
$$[T_1] = \mathbf{C} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_B \\ T_4 \\ T_5 \end{bmatrix} + \mathbf{D} \begin{bmatrix} T_0 \\ T_6 \end{bmatrix},$$

kde

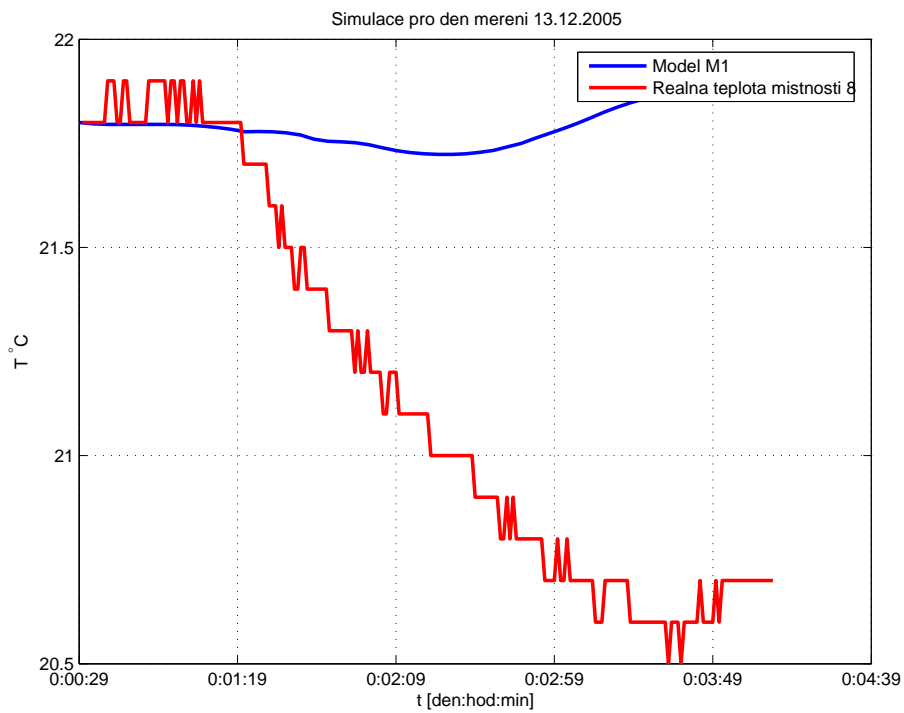
$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{Y_1 + Y_B + Y_2 + Y_{36}}{C_1} & \frac{Y_2}{C_1} & \frac{Y_B}{C_1} & 0 & \frac{Y_{36}}{C_1} \\ \frac{Y_2}{C_2} & -\frac{Y_2 + Y_4}{C_2} & 0 & \frac{Y_4}{C_2} & 0 \\ \frac{Y_B}{C_B} & 0 & -\frac{Y_B}{C_B} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{Y_1}{C_1} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

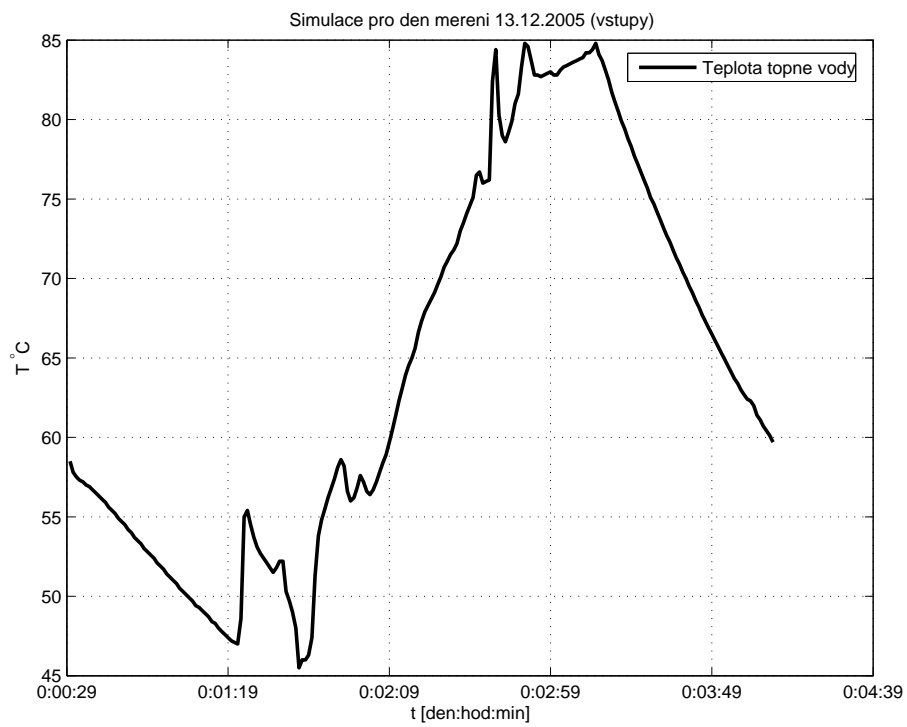
$$\mathbf{C} = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0], \quad \mathbf{D} = [0 \ 0].$$



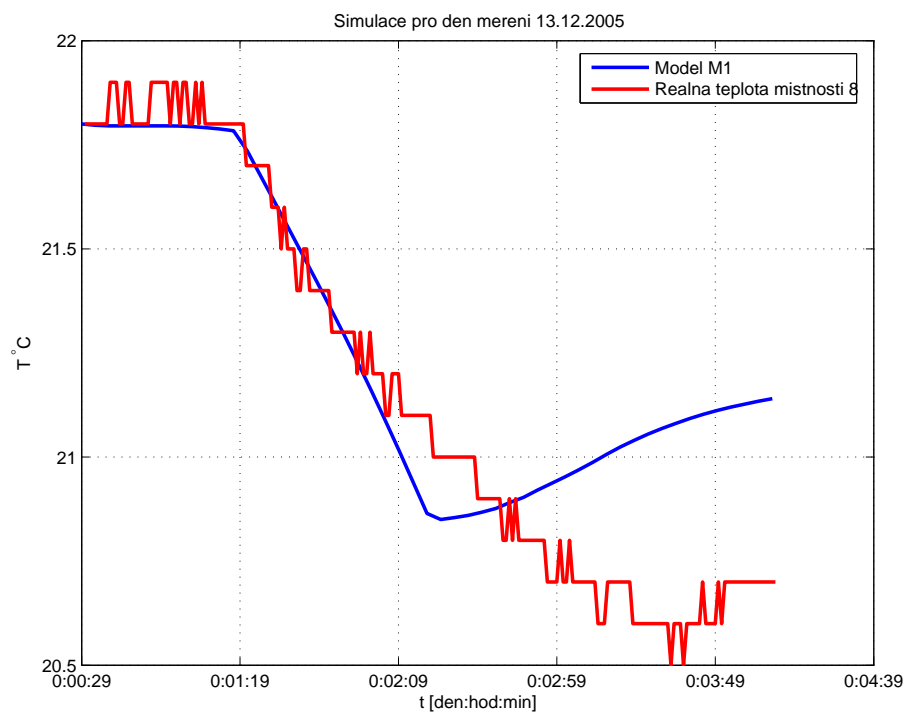
Obrázek 8.10: Schéma rozšířeného modelu 2



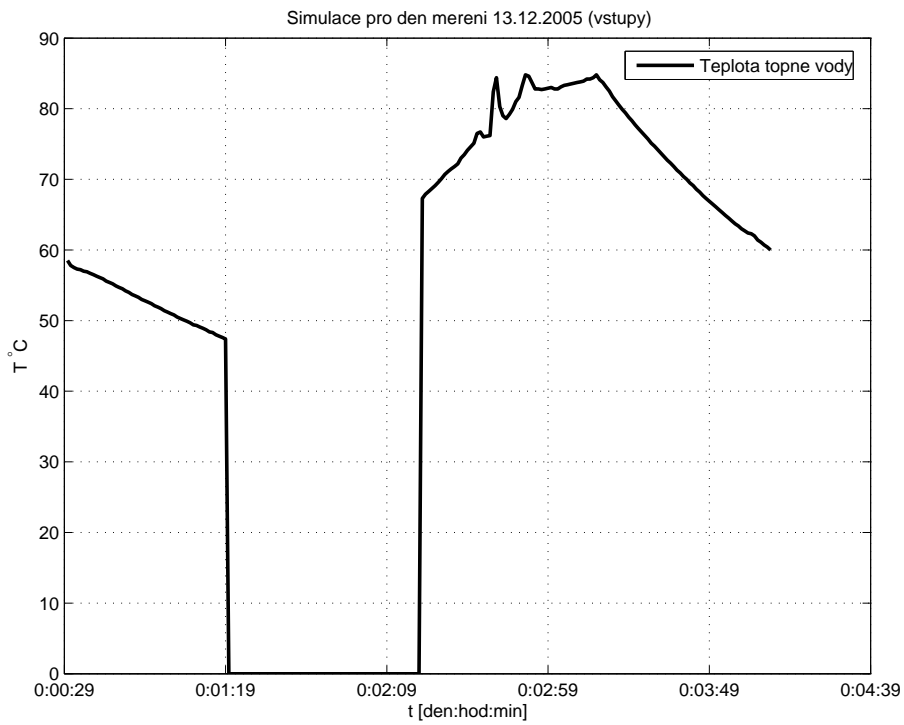
Obrázek 8.11: Předpokládaný průběh teploty v místnosti



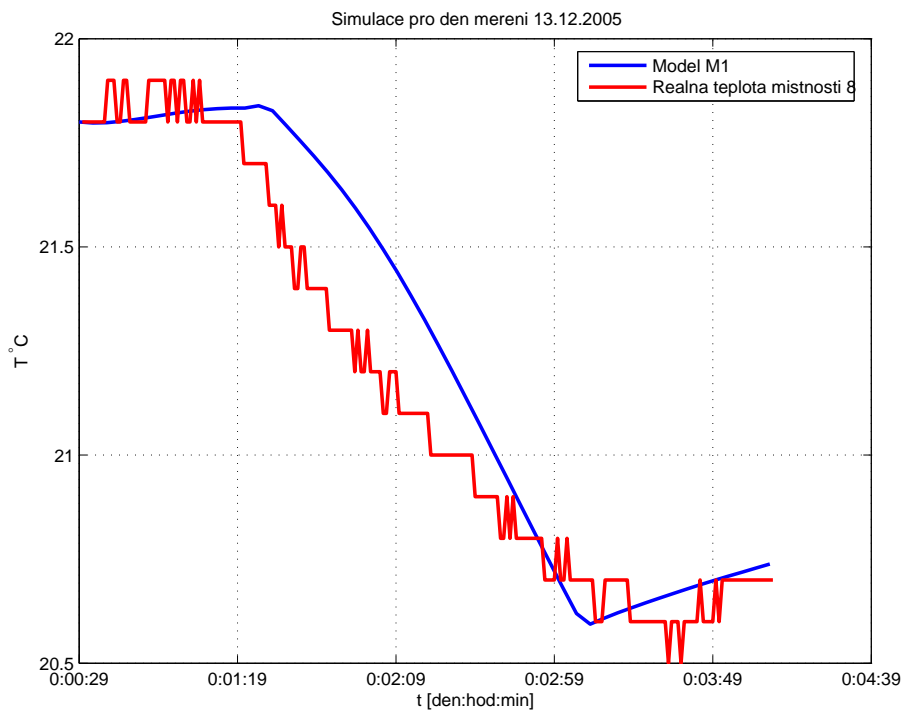
Obrázek 8.12: Teplota topné vody v oběhu



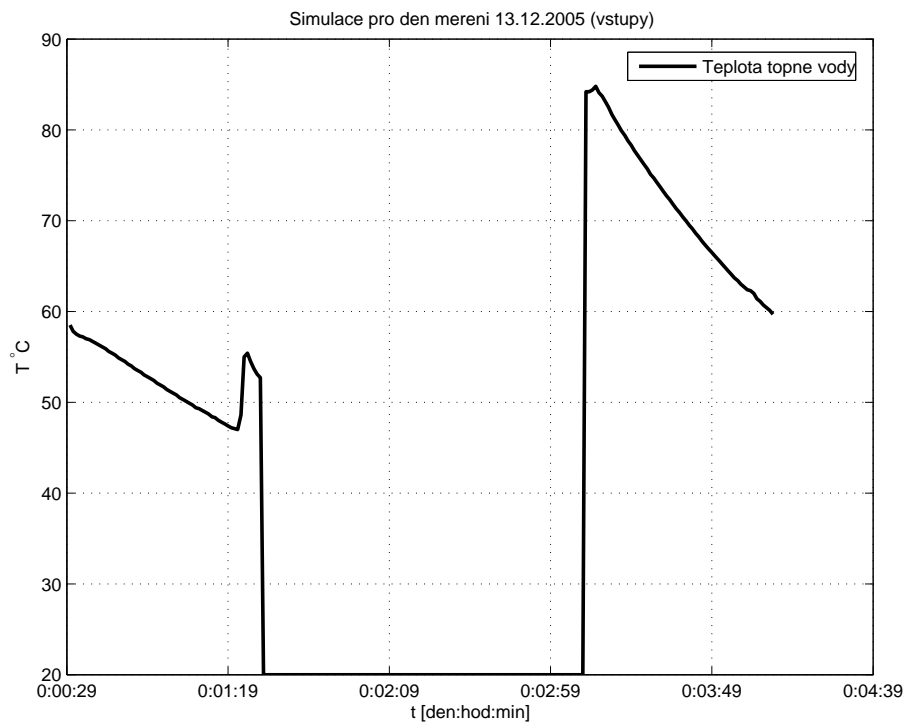
Obrázek 8.13: Průběh teploty v místnosti při zásahu podle obr. 8.14



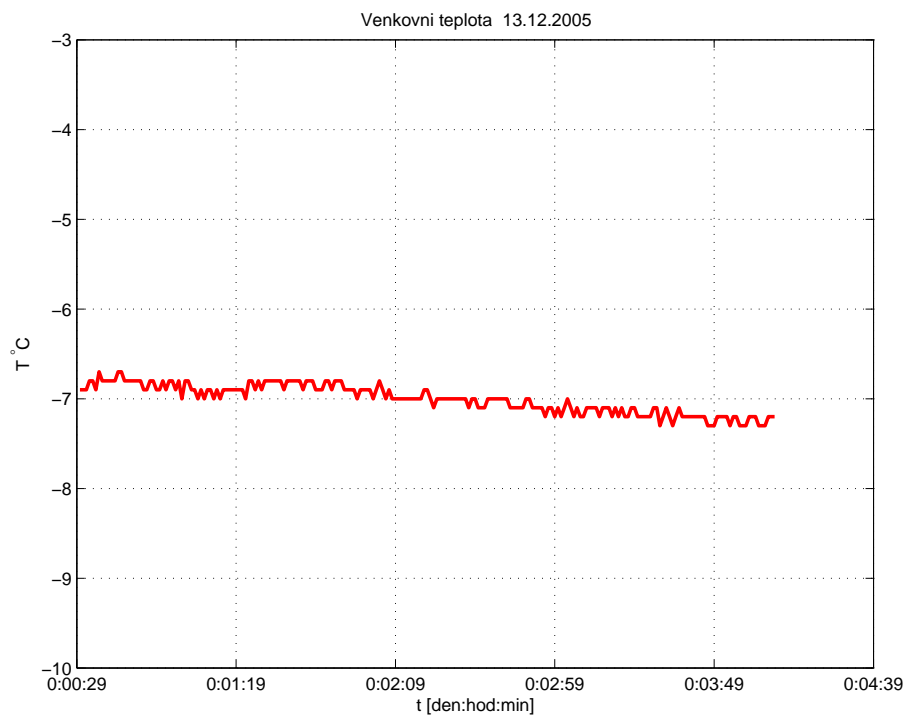
Obrázek 8.14: Topná voda - zavřený ventil



Obrázek 8.15: Průběh teploty v místnosti při zásahu podle obr. 8.16

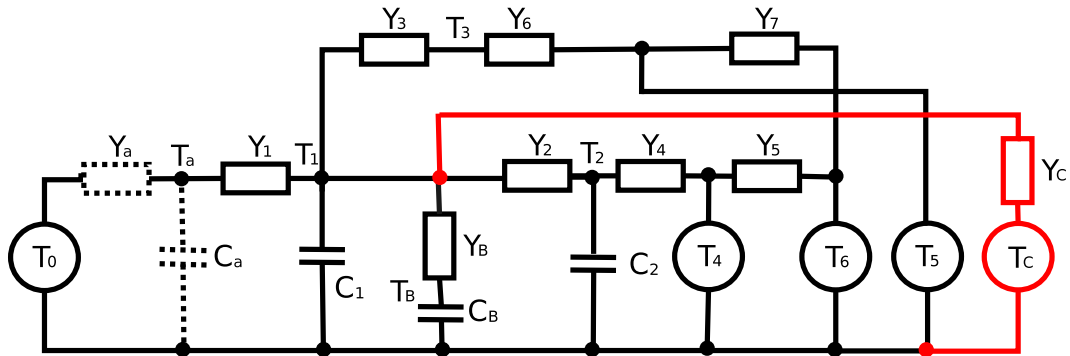


Obrázek 8.16: Topná voda - zavřený ventil



Obrázek 8.17: Venkovní teplota

Další možností rozšíření modelu je vidět na obrázku 8.18. Jedná se o vliv přítomnosti osoby nebo osob. Jak je zakresleno v obrázku, bude přítomnost člověka přímo ovlivňovat jen teplotu vzduchu v místnosti.



Obrázek 8.18: Schéma rošířeného modelu 3

T_C je průměrná teplota osoby či osob v místnosti

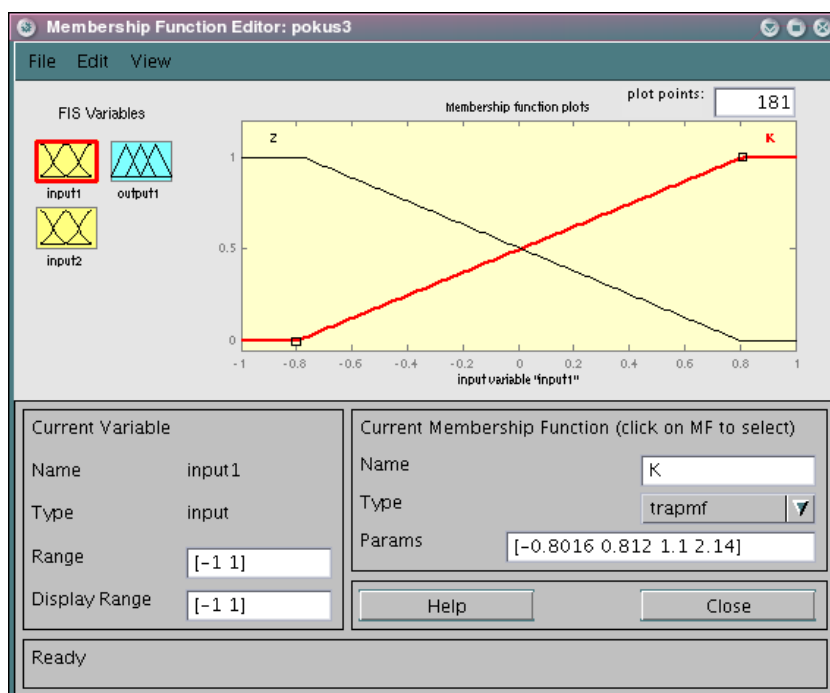
Y_C charakterizuje tepelný přestup mezi osobou a vzduchem.

Kapitola 9

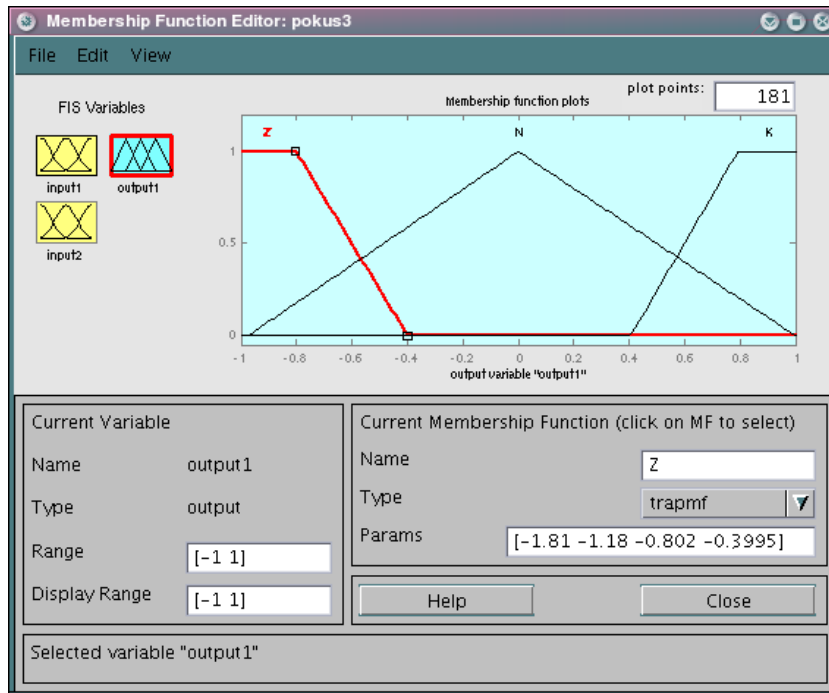
Návrh regulátorů

Pro účely návrhu regulátorů je vzhledem k velmi nízkým hodnotám v maticích modelu nutné provést zjednodušení. Z tohoto důvodu jsem převedl stavový popis modelu na přenos systému, a teprve potom navrhoval regulátory. Navržené regulátory jsem testoval na zjednodušeném modelu a též na původním. Regulátory typu **PID** byly navrhovány v MATLABu systémem *rltool*, fuzzy regulátory byly navrženy a realizovány s pomocí fuzzy toolboxu pro matlab systémem *anfisedit* viz [6], [7].

9.1 Fuzzy regulátor



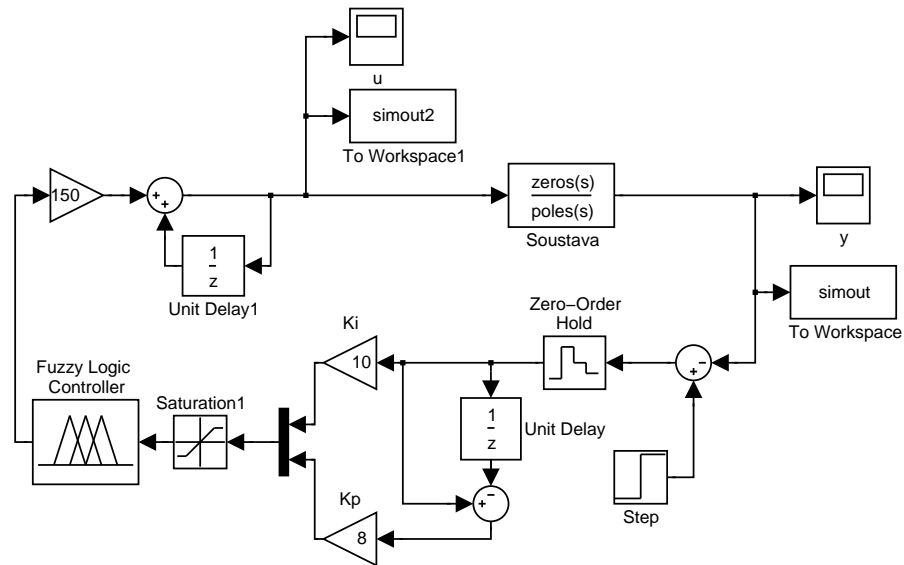
Obrázek 9.1: Množina příslušnosti vstupu fuzzy regulátoru



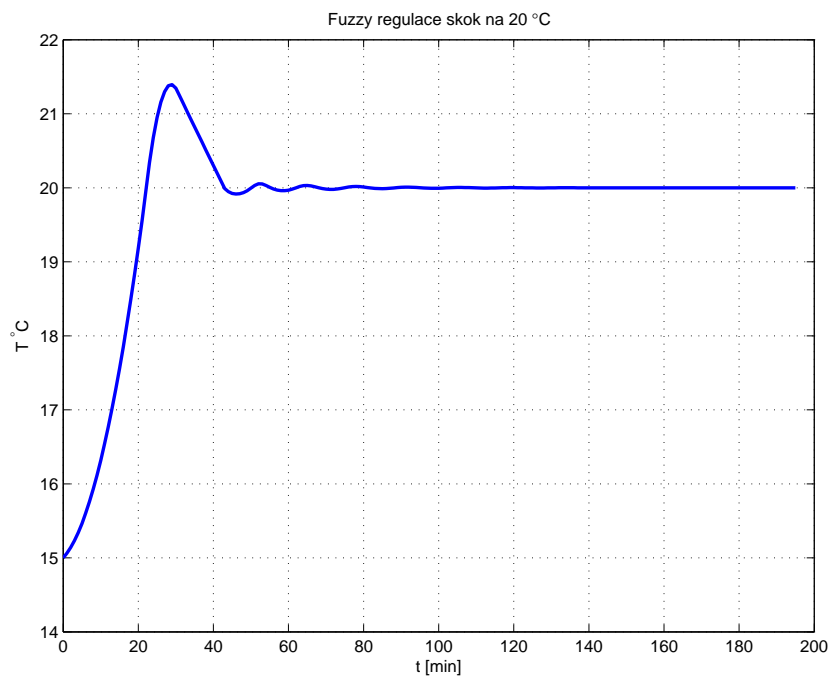
Obrázek 9.2: Množina příslušnosti výstupu fuzzy regulátoru

Báze pravidel fuzzy regulátoru je

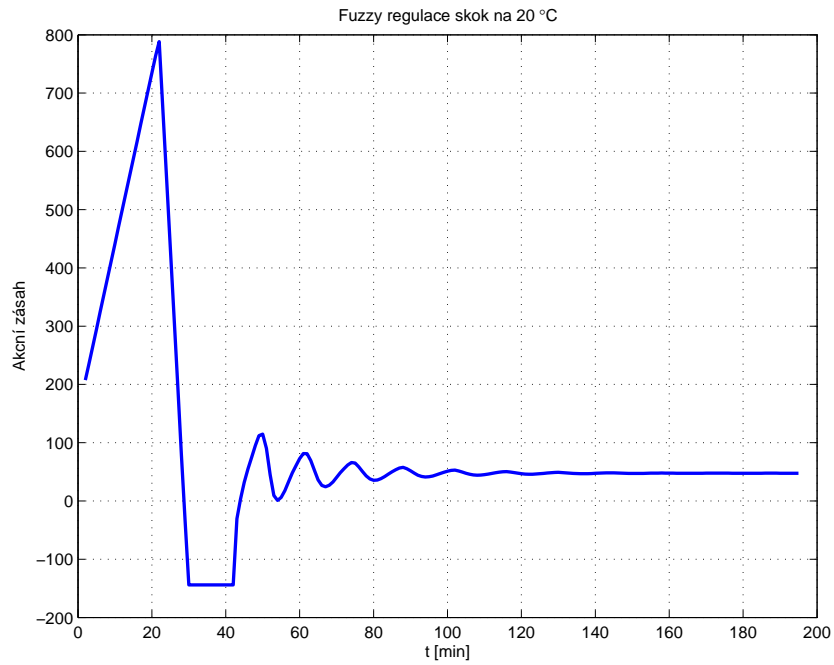
$$\begin{aligned}
 & \textit{if } in1.K \textit{ AND } in2.Z \textit{ THEN } out.N, \\
 & \textit{if } in1.K \textit{ AND } in2.K \textit{ THEN } out.K, \\
 & \textit{if } in1.K \textit{ AND } in2.Z \textit{ THEN } out.K, \\
 & \textit{if } in1.Z \textit{ AND } in2.Z \textit{ THEN } out.Z.
 \end{aligned}
 \tag{9.1}$$



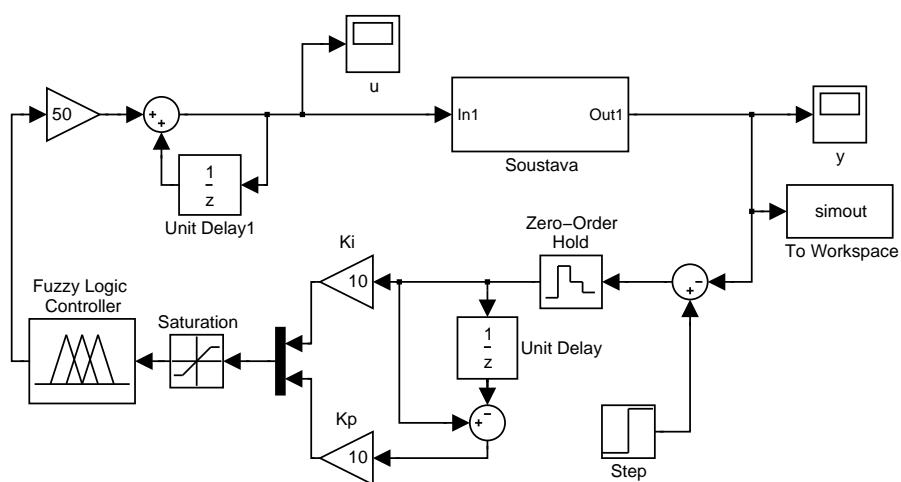
Obrázek 9.3: Fuzzy regulace na zjednodušeném modelu



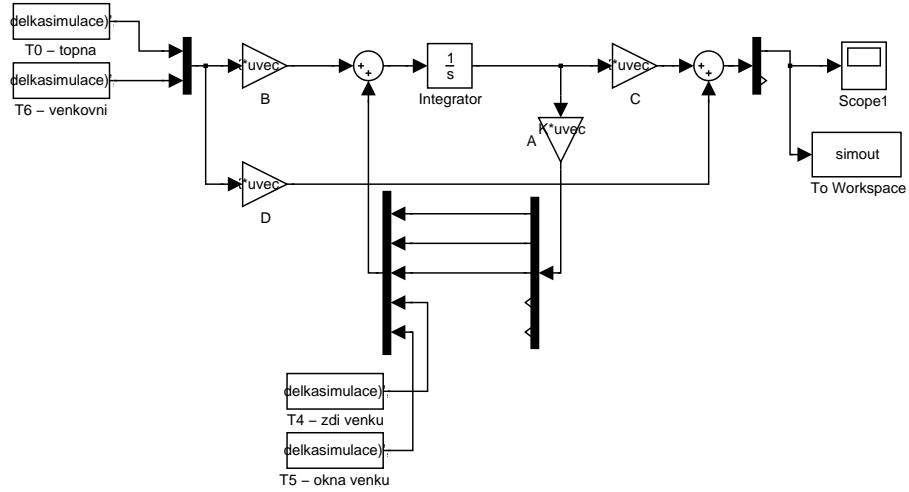
Obrázek 9.4: Reakce na skok žádané hodnoty



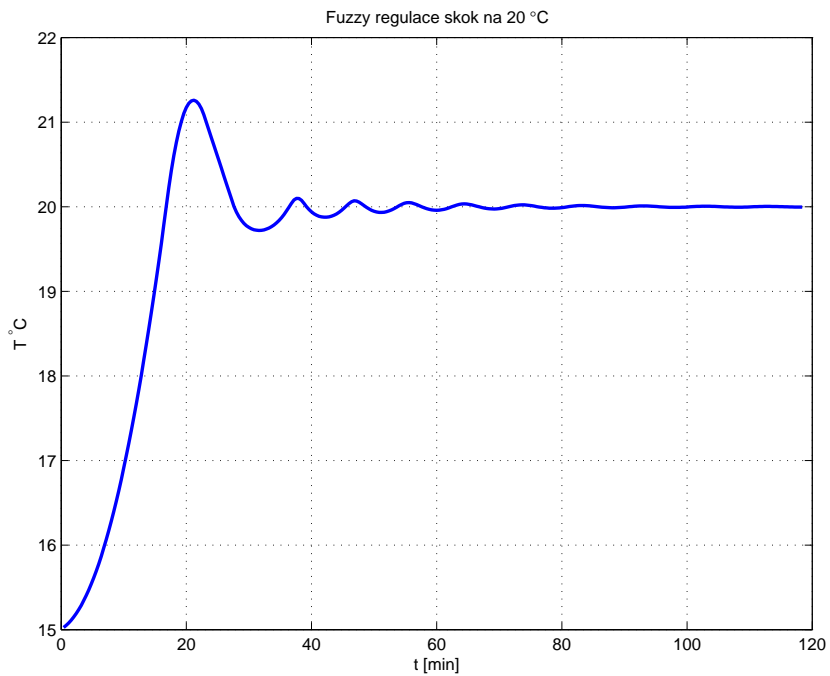
Obrázek 9.5: Akční zásah fuzzy regulátoru



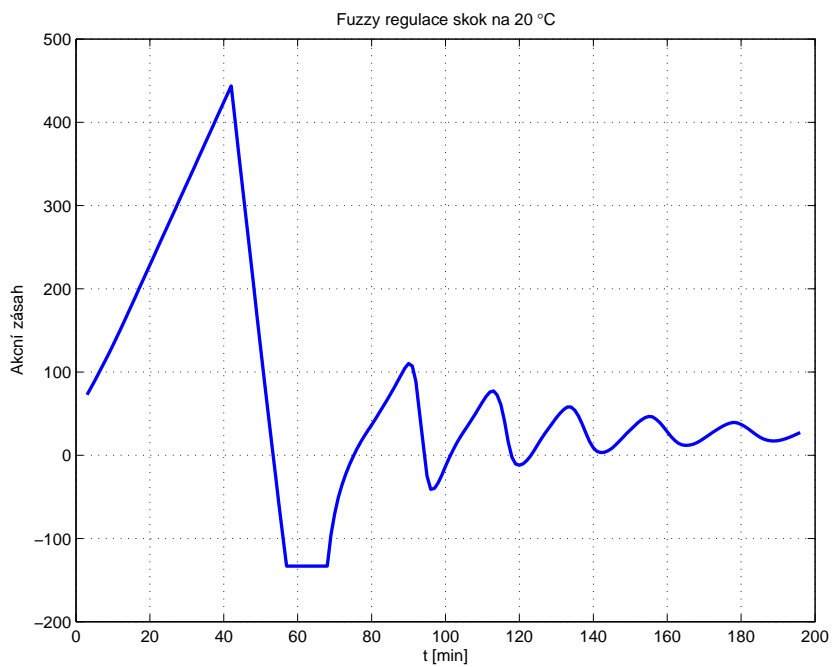
Obrázek 9.6: Fuzzy regulace na původním modelu



Obrázek 9.7: Model respektující venkovní vlivy

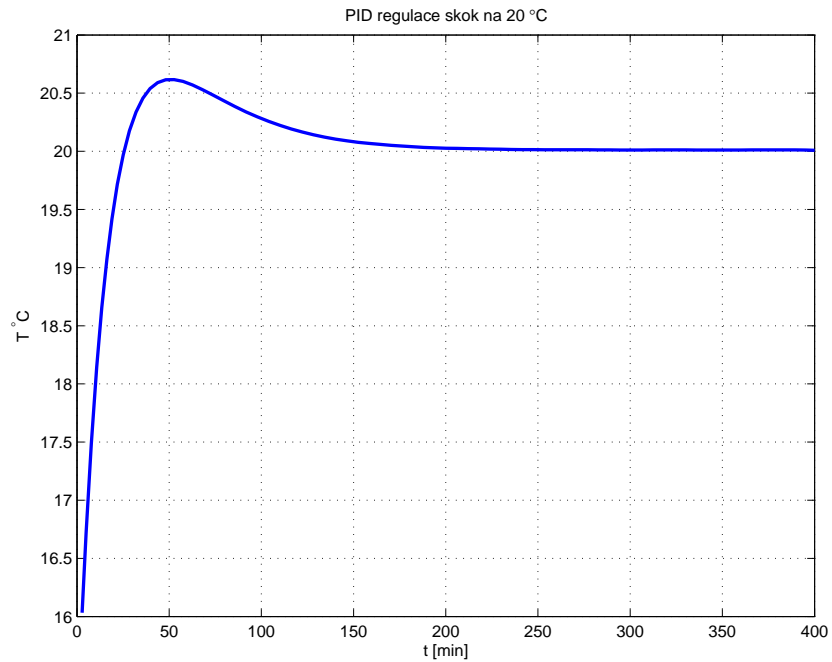


Obrázek 9.8: Reakce na skok žadané hodnoty

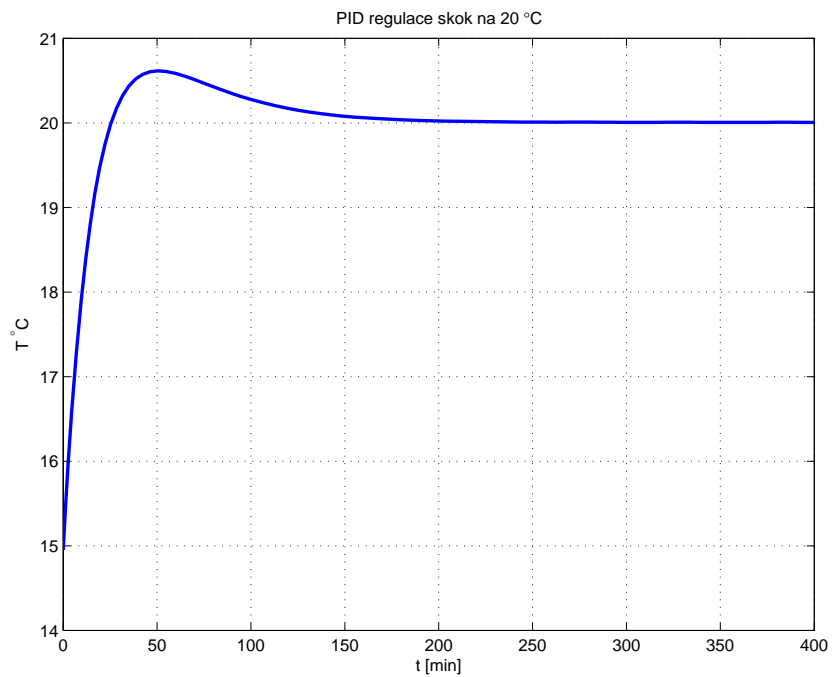


Obrázek 9.9: Akční zásah fuzzy regulátoru

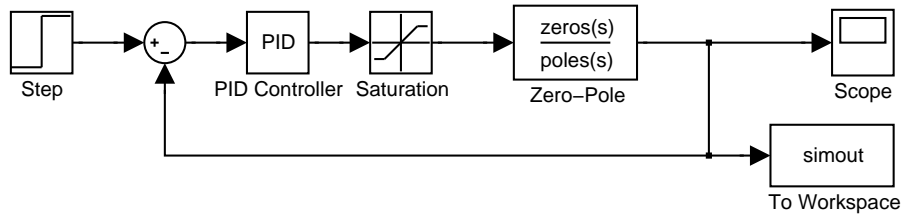
9.2 PID regulátor



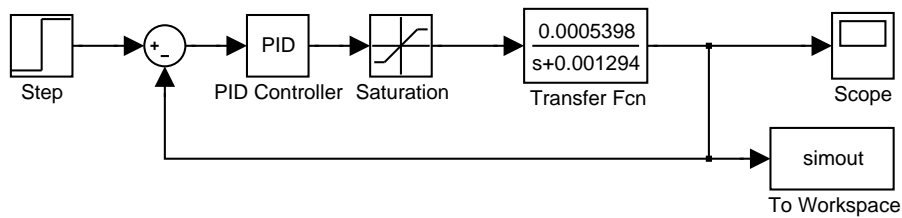
Obrázek 9.10: Reakce na skok žádané hodnoty - původní model



Obrázek 9.11: Reakce na skok žádané hodnoty - zjednodušený model

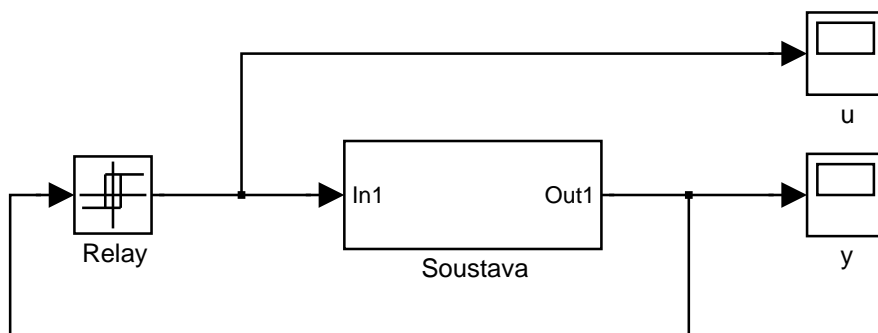


Obrázek 9.12: Původní model s PID regulátorem

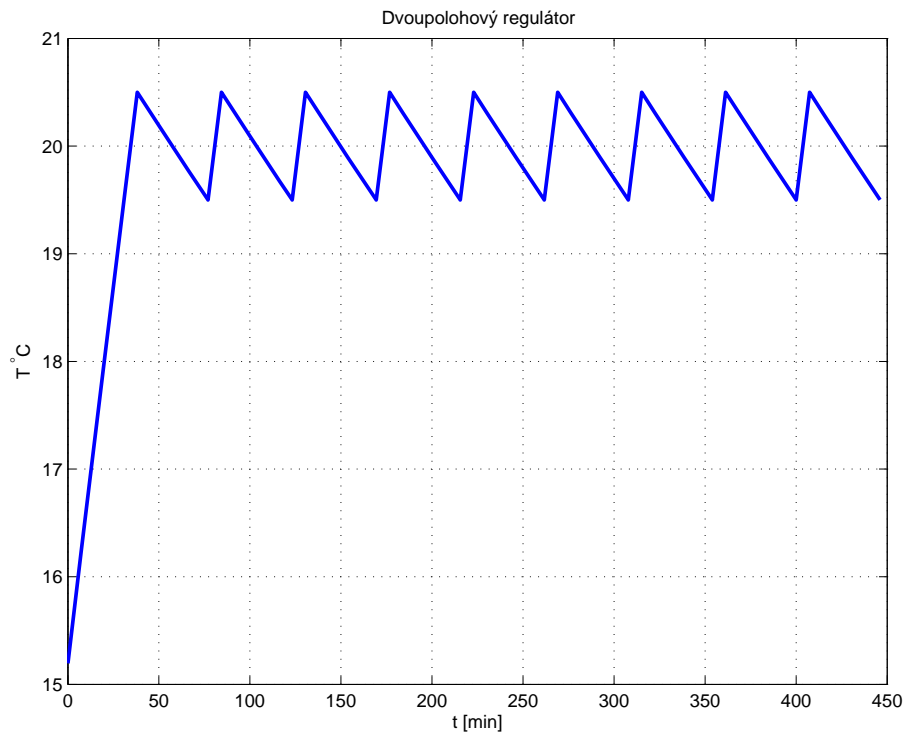


Obrázek 9.13: Zjednodušený model s PID regulátorem

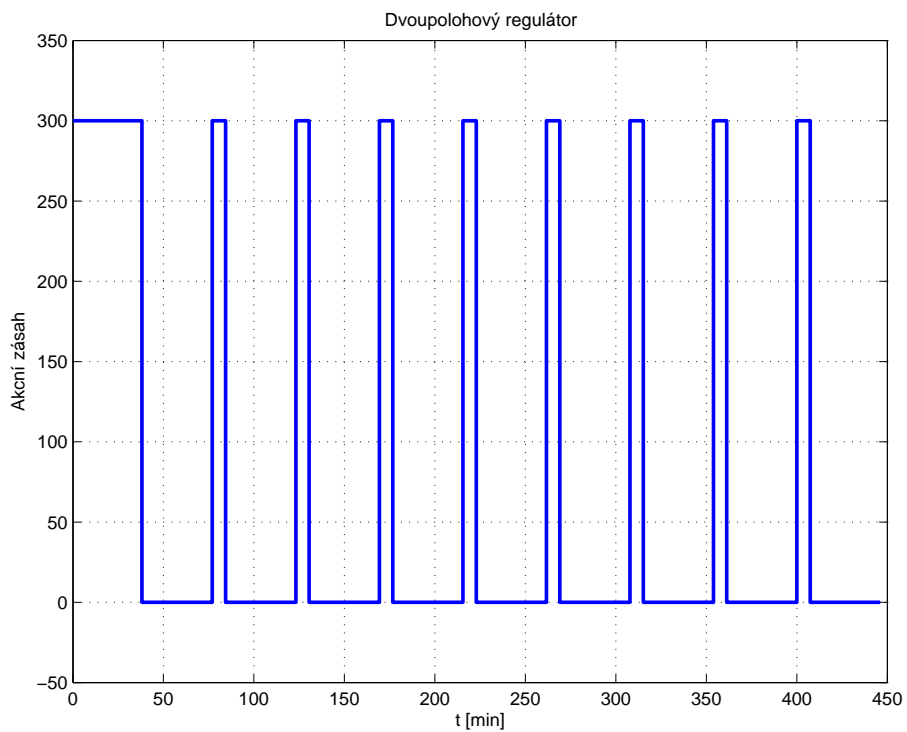
9.3 Dvoupolohový regulátor



Obrázek 9.14: dvoupolohový regulátor - původní systém



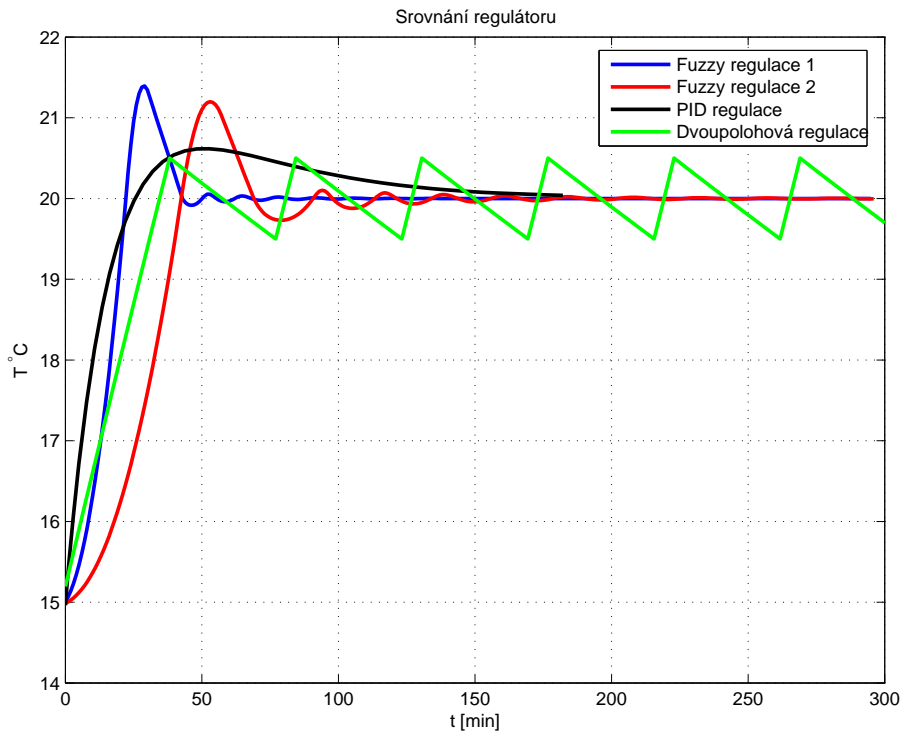
Obrázek 9.15: Dvoupolohový regulátor - skok žádané hodnoty



Obrázek 9.16: Dvoupolohový regulátor - akční zásah

9.4 Shrnutí

V této kapitole byly navrženy regulátory **PID**, **fuzzy** a **dvoupolohový regulátor**, které byly testovány na zjednodušeném modelu určeném pro návrh i na původním modelu respektující vlivy okolí. Na obrázku 9.17 je vidět srovnání regulátorů pro skok žádané hodnoty z 15 °C na 20 °C. V obrázku je pouze jeden graf pro **PID** regulátor, a to z důvodu obdobných výsledků regulace na obou modelech.



Obrázek 9.17: Srovnání regulátorů

Kapitola 10

Závěr

Úkolem této práce bylo analyzovat vlastnosti základních typů budov z hlediska vytápění a následně pak z hlediska regulace, dále vytvořit postupně několik modelů vytápěného prostoru a navrhnout regulátory.

V úvodu práce se snažím čtenáře seznámit se základy termodynamiky, tepelné prostupnosti a s tepelnou kapacitou látek. Další část práce seznamuje čtenáře s programovatelnými PLC automaty firmy Teco Tecomat, Tecoreg. Je zde stručně zmíněna struktura a princip těchto automatů. Součástí přiloženého CD je i koncept programu regulátoru pro PLC napsaný pro systém MOSAIC. V další části se práce zabývá vytvořením modelu místnosti. Prvním modelem je jednoduchý matematický model, který umožňuje přibližný odhad tepelných ztrát místnosti na základě tepelné prostupnosti do venkovního prostoru a do okolních místností. Tento výpočet je realizovatelný i bez použití složitých matematických nástrojů jako MATLAB–Simulink. Všechny ostatní modely jsou realizovány s využitím programu MATLAB ve formě spustitelných skriptů pro snadné změny, přenositelnost modelů na jiné budovy a jejich parametrizaci. Dalším modelem je jednoduchý stavový model druhého řádu. Tento model nerespektuje vliv vnitřního zdiva. Motivací pro vznik tohoto modelu byla myšlenka na odhadování celkových tepelných ztrát budovy. Prostup mezi místnostmi tedy v tomto případě není považován za ztráty, protože se jedná o energii v celé budově. Tento model tedy respektuje pouze ztráty budovy vnějším zdivem a okny. Další model vznikl rozšířením předcházejícího modelu o vliv vnitřního zdiva, tedy rozšířením na model třetího řádu. Tento model, jak je patrné z obrázků, dosahoval dobrých výsledků na testovacích datech. Třetí model má za úkol respektovat vnější vlivy jako je sluneční záření, vliv větru a deště. Tyto vlivy, jak již bylo uvedeno, nejsou měřeny přímo, jsou reprezentovány dalšími stavy v modelu.

Jelikož po vyčíslení dosahovaly matice systému velmi malých hodnot, tím by při výpočtu v MATLABu vznikaly chyby, rozhodl jsem se pro návrhy regulátorů použít zjednodušené modely. Navržené regulátory byly však testovány na zjednodušených modelech i na modelech původních. Oba návrhy dosahovaly velmi podobných výsledků. Pro systém respektující vnější vlivy byly navrženy regulátory typu **PID**, **fuzzy** a **dvoupolohový regulátor**. Srovnání regulátorů vidíme na obrázku 9.17. Regulátory fuzzy dosahují dobrých výsledků. Na grafech akčních zásahů je vidět, že regulujeme systém klimatizace (je možný záporný akční zásah). Jelikož veškeré měření bylo prováděno na budově bez klimatizace, je potřeba zmínit, že systém návrhu fuzzy regulátoru s možností pouze kladného akčního

návrhu je podobný, rozdíl bude v množině příslušnosti výstupu fuzzy regulátoru.

Vstupem modelu pro simulace je venkovní teplota a teplota topné vody. Energie dodaná soustavě (v našem případě místnosti) je dána součinem průtoku a rozdílu teplot topné vody vstupující do topného tělesa a teploty topné vody vystupující z topného tělesa. V našem systému ale nebylo možno měřit průtok topné vody, v důsledku toho vznikají nepřesnosti v modelu.

Vhodným navázáním na tuto práci by proto bylo zahrnout do modelu průtoky topné vody jednotlivými topnými tělesy, aby bylo možné eliminovat nepřesnosti v modelech. Další významný faktor je sluneční záření. Poslední model sice počítá se slunečním zářením, ale pouze tím zářením, které dopadá na venkovní zdivo. V létě značná část slunečního záření může dopadat přímo do místnosti. Pro upřesnění modelu by bylo vhodné uvažovat ohřev předmětů v místnosti od slunečního záření vnikajícího do místnosti nebo ohřev vzduchu v místnosti při spuštěných žaluziích.

Literatura

- [1] ĎAD'Ů, S.; KREIDL, M.: *Senzory a měřicí obvody*, Vydavatelství ČVUT, Praha 1996.
- [2] FENCLOVÁ, M.; PECH, Z.; SUKOVÁ, M.: *Teorie automatického řízení*, Vydavatelství ČVUT, Praha 1998.
- [3] FEYNMAN P., R.; LEIGHTON B., R.; SANDS M.: *Feynmanovy přednášky z fyziky I*. Havlíčkův Brod: FRAGMENT, 2000.
- [4] HORÁČEK, P.: *Systémy a modely*, Vydavatelství ČVUT, Praha 2001.
- [5] JELÍNEK, V.; KABELE, K.: *Technická zařízení budov 20*, Vydavatelství ČVUT, Praha 2001.
- [6] JOHN, J.: *Systémy a řízení*, Vydavatelství ČVUT, Praha 1999.
- [7] MODRLÁK, O.: *Teorie automatického řízení II*.
(<http://www.fm.tul.cz/~krtsub/fm/tr2/tar2.fuz.pdf>), 2004.
- [8] PEKÁREK, S.; MURLA, M.: *Fyzika I Semináře*, Vydavatelství ČVUT, Praha 1997.
- [9] SEDLÁČEK, M.; ŠMÍD, R.: *Matlab v měření*, Vydavatelství ČVUT, Praha 2004.
- [10] ŠTECHA, J.; HAVLENA, V.: *Teorie dynamických systémů*, Vydavatelství ČVUT, Praha 2002.
- [11] *Teco CD Info, 9/2003* [CD-ROM]. Kolín: 2003.
- [12] *Teco a. s. – řídicí systémy pro průmysl a budovy* [online]. 2004.
(<http://www.tecomat.cz>)

Seznam obrázků

3.1	Prostupnost stěnou	10
4.1	Znázornění termočlánku a jeho charakteristika	13
4.2	Charakteristika senzoru PT100	17
4.3	Charakteristika senzoru PT100	17
4.4	Třívodičové zapojení senzoru PT100	18
4.5	Běžné principy snímání otáček	20
4.6	Voltampérová charakteristika fotodiody	21
4.7	Voltampérová charakteristika fototranzistoru	22
4.8	Venkovní teploty ve stínu a na slunci	22
5.1	Ohřev TUV deskovým výměníkem	24
5.2	Přechodová a frekvenční charakteristika PI regulátoru	25
5.3	Přechodová a frekvenční charakteristika PID regulátoru	26
5.4	Přechodová a frekvenční charakteristika PD regulátoru	26
5.5	Charakteristika dvupolohového regulátoru s hysterezí	27
5.6	Ekvitermní křivka	28
5.7	Změna komfortu posunem ekvitermní křivky	28
6.1	Programový cyklus PLC	30
7.1	Integrační člunek	34
7.2	Průběhy na integračním člunku	34
7.3	Ideální průběh teploty v místnosti	34
7.4	Reálný průběh teploty v místnosti	35
7.5	Týdení měření jedné místnosti	36
7.6	Den měření jedné místnosti (výřez z obr. 7.5)	36
7.7	Přechodová charakteristika místnosti 1	37
7.8	Přechodová charakteristika místnosti 2	37
7.9	Venkovní teplota	38
7.10	Přechodové charakteristiky sousedících místností	39
7.11	Měření na okně a zdi	40
7.12	Příklad měření na okně	40
8.1	Srovnání výpočtu se skutečným průběhem	43
8.2	Odchyłka vypočteného průběhu	43

8.3	Detail průběhu z obr.8.1	44
8.4	Elektrické schéma tepelných vlastností modelované místnosti	45
8.5	Blokové schéma stavového modelu	47
8.6	Schéma rozšířeného modelu	48
8.7	Srovnání modelů	49
8.8	Srovnání modelů	50
8.9	Schéma rozšířeného modelu 2	50
8.10	Schéma rozšířeného modelu 2	52
8.11	Předpokládaný průběh teploty v místnosti	52
8.12	Teplota topné vody v oběhu	53
8.13	Průběh teploty v místnosti při zásahu podle obr. 8.14	53
8.14	Topná voda - zavřený ventil	54
8.15	Průběh teploty v místnosti při zásahu podle obr. 8.16	54
8.16	Topná voda - zavřený ventil	55
8.17	Venkovní teplota	55
8.18	Schéma rozšířeného modelu 3	56
9.1	Množina příslušnosti vstupu fuzzy regulátoru	57
9.2	Množina příslušnosti výstupu fuzzy regulátoru	58
9.3	Fuzzy regulace na zjednodušeném modelu	59
9.4	Reakce na skok žádané hodnoty	59
9.5	Akční zásah fuzzy regulátoru	60
9.6	Fuzzy regulace na původním modelu	60
9.7	Model respektující venkovní vlivy	61
9.8	Reakce na skok žádané hodnoty	61
9.9	Akční zásah fuzzy regulátoru	62
9.10	Reakce na skok žádané hodnoty - původní model	63
9.11	Reakce na skok žádané hodnoty - zjednodušený model	63
9.12	Původní model s PID regulátorem	64
9.13	Zjednodušený model s PID regulátorem	64
9.14	dvoupolohový regulátor - původní systém	64
9.15	Dvoupolohový regulátor - skok žádané hodnoty	65
9.16	Dvoupolohový regulátor - akční zásah	65
9.17	Srovnání regulátorů	66

Seznam tabulek

4.1	Seebeckovy koeficienty udány vzhledem k olovu	13
4.2	Rozsahy nejběžnějších termočlánků	13
4.3	Převodní tabulka senzoru PT100	18
6.1	Struktura zásobníkové paměti s rozsahy	30

Dodatek A

Obsah přiloženého CD

Maltab – Adresář Matlab obsahuje zdrojové kódy pro návrhy regulátorů a simulaci, simulinková schémata s dokumentací, kódy pomocných a vykreslovacích funkcí, několik datových struktur obsahujících naměřené hodnoty a konstanty pro výpočet a snadnou parametrizaci modelů. Vše v tomto adresáři je vytvořené a spustitelné v systému MATLAB 7.0.4.352 (R14) Service Pack 2.

Obrazky-prostup – Tento adresář obsahuje grafy některých naměřených hodnot týkajících se prostupů zdivem a okny. Grafy jsou ve formátu PDF.

Program – V tomto adresáři se nachází koncept programu regulátoru pro systém Teco.

Přiložené CD dále obsahuje tuto práci ve formátu PDF.