

Programové řešení releového řízení pro TECOMAT FOXTROT pomocí vývojového prostředí Mosaic

David Houška^{1*}

Vedoucí práce: prof. Ing. Milan Hofreiter, CSc.²

¹ ČVUT v Praze, Fakulta strojní, přístrojové a řídicí techniky, Technická 4, 166 07 Praha 6, Česká republika

² ČVUT v Praze, Fakulta strojní, přístrojové a řídicí techniky, Technická 4, 166 07 Praha 6, Česká republika

Abstrakt

Práce se zabývá problematikou releového řízení tepelných soustav s pasivním chlazením. V rámci práce je navržen a odsimulován software releového řízení pro programovatelné automaty TECOMAT FOXTROT. Vlastní program i simulace je provedena ve vývojovém prostředí Mosaic. Pro simulaci je uvažována soustava s nesymetrickou dynamikou. Výstupem práce je diskuse simulovaných výsledků a návrh dalšího postupu včetně experimentálního ověření.

Klíčová slova: PLC, releové řízení, nesymetrická dynamika, regulace, Mosaic

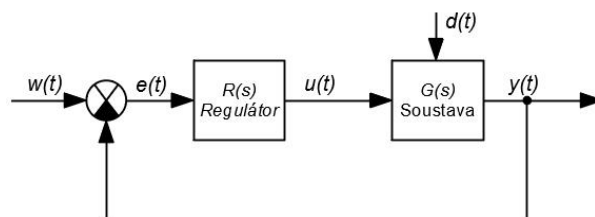
1. Úvod do problematiky

Se všeobecným rozvojem automatizace v posledních dekádách rostou nároky na kvalitu řízených procesů. Ať už se jedná o průmyslové, či civilní aplikace, je snahou tyto procesy optimalizovat za účelem dosažení úspor nákladů a zvyšování kvality. Výjimkou v tomto trendu není ani řízení budov, které dalo vzniknout vlastnímu oboru automatizace *Intelligentní budovy*. Opět se může jednat jak o průmyslové aplikace, kde je potřeba dodržet dané parametry konkrétního procesu, nebo u obytných prostor, kde je cílem udržovat komfortní podmínky pro člověka.

Cílem této práce je vytvoření algoritmu dvupolohového regulátoru pro řízení tepelných soustav s pasivním chlazením s důrazem na co největší omezení výkyvů teploty mimo stanovenou mez. Algoritmus je zamýšlen pro použití v programovatelných automatech (PLC) značky TECOMAT FOXTROT. Regulátor by měl být dostatečně robustní a přesný, ale zároveň jednoduchý na implementaci. Ve výsledné podobě by se mělo jednat o standardní funkci pro program PLC, kterou by mohl vývojář při návrhu softwaru použít.

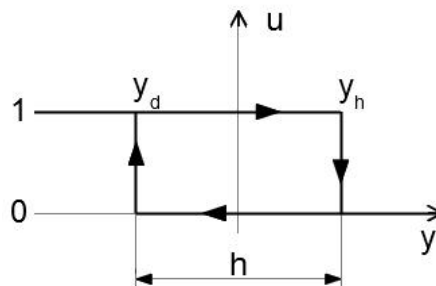
1.1. Dvupolohová regulace

Obecný princip regulace je zobrazen na obrázku 1. Úkolem regulačního obvodu je, aby rozdíl mezi žádanou veličinou $w(t)$ a regulovanou veličinou $y(t)$ byl v daném čase t co nejmenší, ideálně nulový, a to i přes vliv poruchových veličin $d(t)$, působících na soustavu. Tento rozdíl se nazývá regulační odchylka $e(t)$. Regulační odchylka je potom vstupem do regulátoru, přičemž jeho výstupem je akční veličina $u(t)$, kterou regulátor působí na soustavu.



Obr. 1. Regulační obvod

Návrh regulátoru vychází z principu tzv. dvupolohové regulace. Dvupolohový regulátor je typ nespojitého regulátoru, jehož akční veličina $u(t)$ může v závislosti na regulační odchylce nabývat pouze dvou hodnot tj. [1, zapnuto, otevřeno, sepnuto...] nebo [0, vypnuto, zavřeno, rozepnuto...]. V případě tepelných soustav tedy bude mít veličina význam zapnutí/vypnutí otopného tělesa (ventil přívodu topného média, relé stykače napájení elektrickým proudem...).



Obr. 2. Princip dvupolohového regulátoru

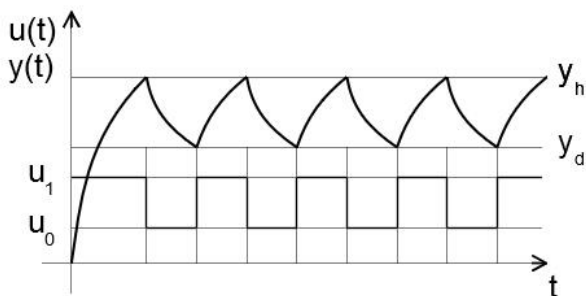
Důležitou vlastností dvupolohového regulátoru je hystereze, tj. toleranční pole, ve kterém se může regulovaná veličina pohybovat, aniž by došlo ke změně akční veličiny. To je znázorněno na obrázku 2, kde u představuje dvoustavovou akční veličinu, y regulovanou veličinu, y_d dolní, vypínací úroveň, y_h horní, zapínací

* Kontakt na autora: David.Houska@fs.cvut.cz

úroveň a jejich rozdíl h je potom šířka hystereze. Hysterezi zavádíme především proto, aby nedocházelo k příliš častému přepínání akční veličiny, navíc větinou není potřeba udržovat regulovanou veličinu na pevně dané úrovni s minimální tolerancí, obzvláště pak u tepelných soustav.

Zásadní výhodou dvupolohového regulátoru je jeho jednoduchost. Oproti často používaným spojitým regulátorům PID není potřeba nastavovat parametry regulátoru a nemusíme předem znát dynamiku systému, abychom tyto parametry správně odhadli.

Na obrázku 3 je vidět průběh regulované veličiny y a akční veličiny u v čase pro případ symetrické soustavy prvního řádu. Zde stojí za povšimnutí, že regulovaná veličina nepřesahuje pásmo hystereze, neboť reaguje na změnu akční veličiny okamžitě. Jinak tomu bude v případě systémů vyšších řádů, což bude ilustrováno v následujících kapitolách.



Obr. 3. Průběh dvupolohové regulace systému prvního řádu

1.2. Nesymetrická soustava

O nesymetrické soustavě mluvíme v případě, kdy dynamika systému při $u=0$ a $u=1$ není stejná (viz. Obr. 3 – symetrický systém). To je zřejmě případ tepelných soustav s pasivním chlazením, neboť soustava (místnost, budova...) bude mít rozdílnou setrvačnost během aktivního ohřevu a pasivního chladnutí. Symetričnosti bychom mohli dosáhnout i v tomto případě, pokud bychom nasadili třístavový regulátor $u=[1,0,-1]$, a tedy disponovali zápornou akční veličinou. V praxi by to znamenalo nasadit vedle topného tělesa i aktivní chlazení se srovnatelným výkonem, což ale příliš nedává smysl.

2. Regulovaná soustava

Abych mohl simulaci ověřit správnost navrženého regulátoru, musel jsem získat model soustavy. Při jeho tvorbě jsem vycházel z prací [5] a [6], jelikož řeší obdobnou problematiku. Jako regulovanou soustavu uvažujeme vytápěný prostor, kde akční veličinou je topné těleso a poruchovou veličinou venkovní teplota. Pro návrh a simulaci budu uvažovat období topné sezóny, tedy teploty okolo $0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

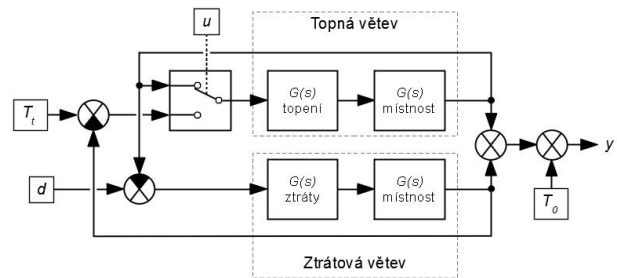
2.2. Nahrazení reálné soustavy

Pro nahrazení reálné soustavy jsou lineární diferenciální rovnice, popisující skutečné chování systému, převedeny pomocí Laplaceovy transformace na přenosové funkce. Ty nám umožňují snáze popsat soustavu. Přenosová funkce soustavy vyjadřuje podíl

obrazu vstupní veličiny $Y(s)$ k obrazu výstupní veličiny $G(s)$. Ve zjednodušené podobě je přenosová funkce prvního řádu popsána rovnicí 1. Zde s je spojitá časová proměnná a T je časová konstanta. Ta udává rychlost přechodu soustavy a můžeme ji taky chápat jako jistou setrvačnost systému. Dle definice nám udává, za jakou dobu dosáhne systém 63,2% hodnoty ustáleného stavu pro jednotkový skok na vstupu systému.

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{1}{T \cdot s + 1} \quad (1)$$

Zjednodušený symetrický model tepelné soustavy získáme spojením přenosu topného tělesa a přenosu místnosti pomocí blokové algebry. Tím získáme přenos druhého řádu charakterizující chování vytápěné místnosti bez ztrát. Analogicky se potom vytvoří i model pasivně ochlazované, ztrátové, soustavy. Celkový model nesymetrické soustavy při řízení dvupolohovým regulátorem je potom zobrazen blokovým schématem na obrázku 4. Kromě již zmíněné topné a ztrátové soustavy (větve celkového modelu) je zde dvupolohový přepínač řízený akční veličinou, který rozhoduje, zda se místnost v daný okamžik aktivně vytápí, nebo pasivně chladí. Dále do systému vstupuje akční veličina v podobě teploty otopného tělesa T_t , poruchovou veličinou d , počáteční teploty místnosti T_0 a zásahu regulátoru u . V našem případě je poruchová veličina dána rozdílem mezi venkovní a počáteční teplotou.



Obr. 4. Model nesymetrické soustavy

Pro model byly použity časové konstanty popsané v tabulce 1. Ty nám spolu s řádem soustavy určují dynamiku systému a zcela jistě budou pro každý reálný systém odlišné. Pro naši úlohu je podstatné, že časová konstanta místnosti a ztrát, je řádově vyšší, než konstanta topení, což dostatečně dobře popisuje realitu.

Tabulka 1. Hodnoty časových konstant soustavy

Časová konstanta T	Hodnota
Topení	20 s
Místnost	800 s
Ztráty	1000 s

Ve skutečnosti na soustavu působí i další faktory (tepelný výkon osob v místnosti, elektrické spotřebiče, nerovnoměrné rozložení teploty atp.), které by měly za následek zvýšení řádu přenosů a setrvačnosti. Pro účel návrhu regulátoru si ovšem vystačíme s dominantními vlivy. Tím získáváme zjednodušený model tepelné soustavy, který lze použít pro simulaci.

3. Vývojové prostředí Mosaic

Pro návrh regulátoru i jeho simulaci pomocí modelu nesymetrické soustavy jsem použil vývojové prostředí Mosaic. To slouží k vývoji a ladění softwaru pro programovatelné logické systémy (PLC) firmy Teco a.s. Kolín. Zároveň je kompatibilní s mezinárodní normou IEC EN-61131-3, která definuje strukturu programů a programovací jazyky pro PLC [3], což zajišťuje přenositelnost i mezi dalšími výrobci PLC. Dle této normy je možné vybrat z následujících programovacích jazyků textových: strukturovaný text *ST*, seznam instrukcí *IL*, či grafických: ladder diagram *LD*, function block diagram *FBD* a continuous flow chart *CFC*. Výhodou grafických jazyků je přehlednost, která se avšak u komplexnějších úloh ztrácí. Pro vývoj dvoupolohového regulátoru jsem zvolil jazyk strukturovaného textu, který se podobá programovacím jazykům jako je *Pascal* či *C*.

3.1. Simulace v Mosaicu

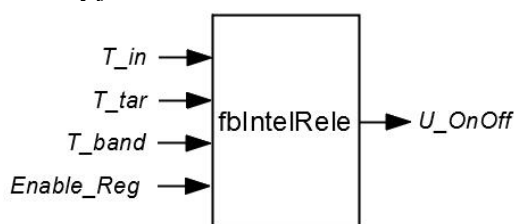
Součástí instalace Mosaicu je i simulovaný/virtuální PLC, který nám umožňuje snadné odlazení programu bez nutnosti jakéhokoliv hardwaru či dalších počítačových aplikací. Je zde možnost také generovat grafy pomocí nástroje *GraphMaker*, který slouží k zobrazení průběhu až 16 proměnných. Aby je bylo možné vykreslit, musí být proměnné typu *globální*, tedy přístupné odkudkoliv z programu. Hodnoty takto získaného časového grafu je následně možno vyexportovat.

Každý program PLC se sestává z takzvaných *programových organizačních jednotek* (POU). Tou mohou být funkce a funkční bloky. Rozdíl mezi nimi je ten, že funkční blok umožňuje zapsání proměnné do paměti bloku, mezitím co funkce je čistě vstupně výstupní. Pro vytvoření simulace jsem tedy použil funkční blok.

Mosaic nabízí širokou škálu předdefinovaných funkcí, resp. funkčních bloků, které může uživatel implementovat ve svém programu. Jednou z nich je i knihovna s názvem *ModelLib v2.2*. Ta v sobě obsahuje funkční bloky jako například *fbDerivator* pro derivaci vstupní proměnné nebo *fbFirstOrder*, který slouží pro simulaci lineárního diferenciálního systému prvního řádu. Díky těmto blokům jsem byl schopný sestavit model nesymetrické tepelné soustavy tak, jak je popsáno v odstavci 2.2.

4. Návrh regulátoru

Vlastní regulátor jsem v prostředí Mosaic implementoval jako funkční blok s názvem *fbIntelRele*. Schématicky je znázorněn na obrázku 5.



Obr. 5. Popis funkčního bloku inteligentního regulátoru

Rozhraní pro použití tohoto funkčního bloku v programu tvoří vstupy a výstupy. Při návrhu jsem chtěl dosáhnout co největší jednoduchosti, aby byl snadno aplikovatelný. Jeho vstupy jsou popsány v tabulce 2. Jeho jediným výstupem je proměnná s názvem *U_OnOff*, která má datový typ *Bool* a nabývá tedy pouze hodnot [0,1] a má význam akčního zásahu regulátoru na systém. Pro jednoduchost jsem pro regulátor uvažoval symetrické pásmo hystereze, popsané rovnicemi 2 a 3.

$$y_h = T_{tar} + \frac{T_{band}}{2} \quad (2)$$

$$y_d = T_{tar} - \frac{T_{band}}{2} \quad (3)$$

Vstupní proměnná *Enable_Reg* umožňuje uživateli rozhodnout, za jakých podmínek může k regulaci docházet a má tedy převážně bezpečnostní charakter.

Tabulka 2. Hodnoty časových konstant soustavy

Vstup	Význam	Datový typ
T_in	Měřená aktuální teplota místnosti	REAL
T_tar	Žádaná regulovaná teplota místnosti	REAL
T_band	Šířka symetrického pásma hystereze	REAL
Enable_Reg	Povolení výstupu regulátoru	BOOL

Vnitřní strukturu regulátoru pak tvoří celá řada statických proměnných, které jsou nezbytné pro správné vyhodnocení regulačního zásahu. Při jeho tvorbě jsem také použil některé funkce ze základní knihovny *StdLib v2.1*, která je ošem součástí každého nového projektu vytvořeného v prostředí *Mosaic* a funkční blok jako takový je tedy eventuelně možné zahrnout do knihovny prostředí *Mosaic*.

4.1. Dvoupolohová regulace

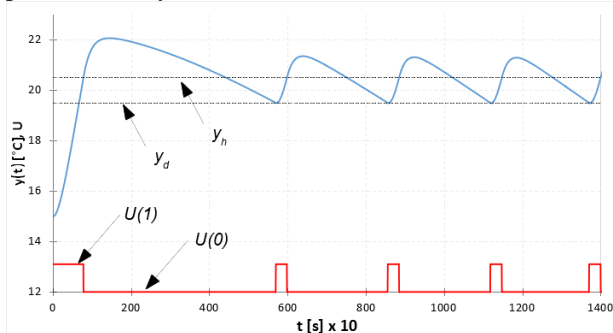
Při postupu návrhu regulátoru jsem opět vycházel z prací pánů Straky a Richtára [5], [6]. V první řadě jsem otestoval obyčejnou dvoupolohovou regulaci, která pak naznačí další kroky v optimalizaci regulátoru.

Pro testování všech postupů návrhu regulátoru jsem použil stejných vstupních parametrů, aby bylo možné výsledky snadno porovnat. Výsledky testů s rozdílnými parametry v práci neuvádím, jelikož se v principu neliší, pokud bude hodnota parametrů odpovídat realitě. Kromě časových konstant uvedených v tabulce 1 jsou vstupní parametry popsány níže v tabulce 3.

Tabulka 3. Hodnoty časových konstant soustavy

Parametr	Význam	Hodnota
T_i	Teplota topení	$80\text{ }^\circ\text{C}$
T_0	Počáteční teplota	$15\text{ }^\circ\text{C}$
T_{tar}	Žádaná teplota	$20\text{ }^\circ\text{C}$
T_{band}	Šířka pásma hystereze	$1\text{ }^\circ\text{C}$

Na obrázku 6 je vidět průběh teploty systému při řízení pouze dvoupolohovým regulátorem. V průběhu dochází ke značným překmitům v důsledku setrvačnosti, tj. když regulovaná teplota přesáhne horní hranici hystereze y_h . Lze si všimnout, že v první kmit je větší, než překmity následující. To je dáno delší dobou působení akčního zásahu regulátoru pro počáteční podmínku nižší než vypínací úroveň, a tím i větší setrvačností. Tyto překmity se budeme snažit v následujících krocích optimalizace eliminovat, neboť představují nežádoucí, ztrátový, jev. Při pasivním chlazení dochází i k podkmitům pod dolní hranici hystereze y_d , ale vzhledem k rozdílu dynamik topení a chlazení jsou jen velmi nepatrné a nebudu se jimi proto dále zabývat.


Obr. 6. Graf průběhu teploty řízený dvoupolohovým regulátorem

4.2. Adaptace vypínací úrovně

Aby nedocházelo k překmitům teploty nad stanovenou mez, můžeme měnit vypínací úroveň h_{vyp} tak, abybyhom včas přerušili akční zásah regulátoru a teplota vlastní setrvačností dosáhla právě horní meze. V případě obvyklé dvoupolohové regulace byla vypínací úroveň pevně daná, rovna horní hranici pásma hystereze.

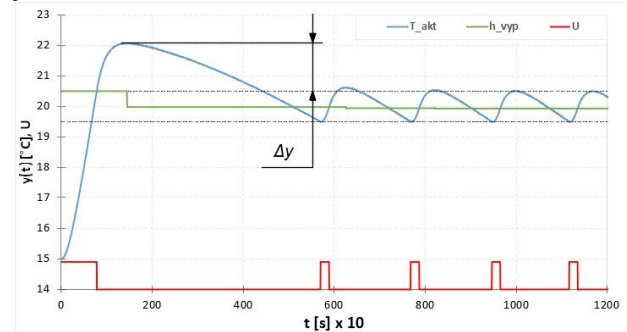
Základní myšlenkou je úprava vypínací úrovně podle předchozího překmitu tak, aby se s každým dalším topným cyklem snižoval, ideálně úplně eliminoval. Velikost úpravy vypínací úrovně bude závislá na velikosti překmitu podle vztahu 4.

$$h_{vyp}(n) = h_{vyp}(n-1) - \frac{\Delta y}{3} \quad (4)$$

Aktuální vypínací úroveň je dána velikostí předchozí vypínací úrovně, poníženo o jednu třetinu velikosti překmitu Δy posledního topného cyklu. Hodnota Δy je pak dána rozdílem mezi maximální teplotou jednoho topného cyklu a horní hranici hystereze. Pokud je maximální teplota nižší, než horní hranice, bude mít Δy zápornou hodnotu, a vypínací úroveň opět poroste. To má za následek jednoduchou iterační regulaci vypínací úrovně.

Ta by však nikdy neměla opustit pásmo hystereze. Koefficient 1/3 je empirická hodnota. Pokud by byl příliš vysoký, mohlo by dojít k rozkmitání systému, pro příliš nízký koeficient je změna vypínací úrovně příliš pomalá.

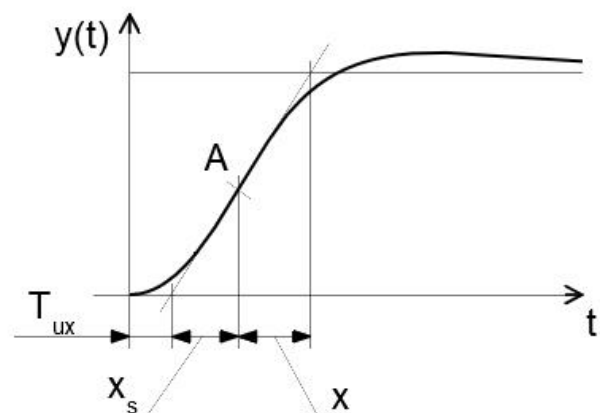
Na obrázku 7 je vidět průběh teploty s adaptací vypínací úrovně a vyznačenou veličinou Δy . Zde už u druhého kmitu vydáme relativně velikou přesnost adaptivní regulace. Dominantním se nyní stává první překmit, který by za běžných podmínek nemusel být příliš nežádoucí. Například pro vytápění obytných prostor je nárůst teploty o $2\text{ }^\circ\text{C}$ oproti požadované teplotě jen málo znatelný. Přesto jsem se v rámci optimalizace zaměřil i na jeho redukci.


Obr. 7. Graf průběhu teploty řízený dvoupolohovým regulátorem s adaptivní vypínací úrovní

4.3. Omezení prvního překmitu

Problémem regulace prvního překmitu je fakt, že v důsledku jednoduchosti regulátoru předem nepožadujeme znalost dynamiky soustavy, a musíme vycházet pouze z aktuálních hodnot měřené teploty.

Na obrázku 8 je znázorněna přechodová charakteristika systému druhého řádu. Pokud zvolíme libovolný bod křivky A a vedeme tímto bodem tečnu, můžeme vytyčit časové úseky T_{ux} , x_s a x . Pokud by bod A byl zároveň inflexním bodem křivky, tak T_{ux} má význam doby průtahu a součet x_s a x doby náběhu systému, což jsou veličiny využívané především pro ke grafickému vyhodnocování soustav.


Obr. 8. Přechodová charakteristika systému druhého řádu s vyznačenými časovými parametry

Pro omezení prvního překmitu vycházíme z toho, že doba průtahu a doba náběhu systému má podobný průběh, tj. trvá srovnatelnou dobu. Pokud omezíme zásah akčního

členu v momentě, kdy $T_{ux} = x$, měla by teplota po vypnutí topení dosáhnout námi požadované úrovně. Jednoduchou úvahou získáme na základě obrázku 8 následující rovnice pro výpočet časových veličin T_{ux} a x .

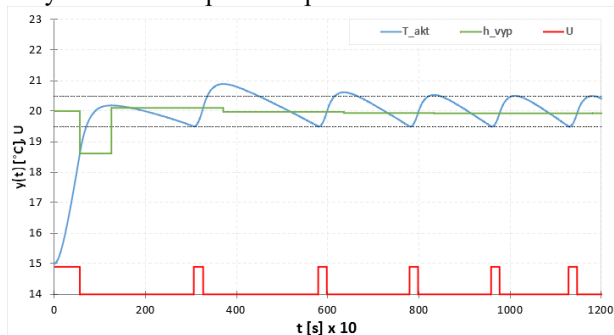
$$T_{tar} = dT_{in} \cdot x + T_{in} \quad (5)$$

$$T_{in} = dT_{in} \cdot x_s + T_0 \quad (6)$$

$$T_{ux} = t - x_s \quad (6)$$

Zde dT_{in} značí časovou derivaci aktuální teploty místnosti a t čas uplynulý od počátku regulace, zbytek proměnných již byl popsán.

Obrázek 9 vykresluje průběh teploty při použití obou metod: omezení prvního překmitu a adaptivní vypínací úrovně pro omezení překmitů následujících. Hladina prvního cyklu se ustálila na požadované teplotě díky včasnému omezení akčního zásahu, nicméně jsme tím ztratili informaci pro nastavení vypínací úrovně dalších cyklů. Pro druhý cyklus jsem nastavil vypínací úroveň rovnou požadované hodnotě, což má ovšem za následek překmit druhého cyklu. Tímto problémem se budu dále zabývat v rámci diplomové práce.



Obr. 9. Graf průběhu teploty řízený inteligentním dvoupolohovým regulátorem

4. Závěr

Naprogramoval a otestoval jsem algoritmus pro releové řízení otopných soustav v prostředí Mosaic. Výsledky provedených simulací jsou slibné, nicméně jejich validitu je potřeba ověřit na skutečných soustavách. V ideálním případě by se mělo jednat o řízení teploty místnosti během topné sezóny, případně v letních měsících a úlohu chápat reverzně, tzn. namísto topení by byla akčním zásahem klimatizace. Vzhledem k principu navrženého regulátoru by mělo být možné ho implementovat i pro systémy s podstatně rychlejší dynamikou.

Literatura

- [1] HOFREITER, Milan. *Základy automatického řízení*. Česká technika v Praze v roce 2012. ISBN:978-80-01-05007-1
- [2] *Programování PLC podle normy IEC 61 131-3 v prostředí Mosaic*. [online]. Teco, a.s., desáté vydání, listopad 2007. Dostupné z: https://www.tecomat.cz/modules/DownloadManager/download.php?alias=txv00321_01_mosaic_progiec_cz
- [3] *Začínáme v prostředí mosaic*. [online]. Teco, a.s., osmé vydání, duben 2010. Dostupné z:

- [4] https://www.tecomat.cz/modules/DownloadManager/download.php?alias=txv00320_01_mosaic_progstart_cz
- [5] STRAKA, Miroslav. *Hybridní systémy pro regulaci tepelných soustav*. Praha, 2004. Diplomová práce. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE. Fakulta dopravní
- [6] RICHTÁR, Dušan. *Reléové řízení tepelných soustav s nesymetrickou dynamikou*. Praha, 2018. Bakalářská práce. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE. Fakulta strojní