



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

REGULACE TEPLoty V DOMÁCÍ UDÍRNĚ

TEMPERATURE CONTROL IN A HOME SMOKE HOUSE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Milan Drulák

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Ivan Švarc, CSc.

BRNO 2023

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automatizace a informatiky
Student: **Milan Drulák**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Ivan Švarc, CSc.**
Akademický rok: 2022/23

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijníma zkušebníma řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Regulace teploty v domácí udírně

STRUČNÁ CHARAKTERISTIKA PROBLEMATIKY ÚKOLU:

Tato práce má navrhnout nový počítačem řízený způsob regulace teploty při uzení v domácích udírnách s ohledem na dosažení optimálních podmínek při uzení. Současná metoda uzení v domácích udírnách je víceméně intuitivní a založená na zkušenostech a praxi člověka. Je potřeba tento proces automatizovat, a tím docílovat optimálních výsledků. To je problémem této práce.

CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE:

Teoretický rozbor regulace teploty v průmyslových aplikacích.
Konstrukční popis udírny a její funkce.
Řešení konkrétních teplotních stavů udírny.
Návrh snímačů a technického zařízení pro regulaci a měření v udírně.
Odkoušení a odměření průběhu uzení v praxi.
Porovnání výsledků s požadovanými hodnotami.
Zhodnocení výsledků.

SEZNAM DOPORUČENÉ LITERATURY:

ŠVARC, Ivan, MATOUŠEK, Radek, ŠEDA, Miloš, VÍTEČKOVÁ, Miluše. *Automatické řízení*. Akademické nakladatelství CERM, VUT v Brně 2011, ISBN 978-80-214-4398-3.

VÍTEČKOVÁ, Miluše, VÍTEČEK, Antonín. *Vybrané metody seřizování regulátorů*. Fakulta strojní VŠB – TU Ostrava 1998.

HOFREITER, Milan. *Identifikace systémů I*. Nakladatelství ČVUT Praha 2009.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Radomil Matoušek, Ph.D.

ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.

děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá přestavbou domácí udírny s ruční regulací teploty na udírnu s automatickou regulací teploty. V práci se nachází teoretické pojednání o teploměrech, které se využívají pro automatizaci. Následuje praktická část, ve které je popsán stav udírny před automatizací regulace teploty a stav udírny po instalaci potřebných modifikací pro automatizaci regulování teploty. V praktické části je i ukázáno, jak pracovat ve vývojovém prostředí Mosaic české firmy Teco a.s. Výsledkem práce je funkční prototyp udírny s automatickou regulací teploty. Řídicí program této udírny s automatickou regulací teploty je schopen přepínat mezi dvěma způsoby regulace teploty (dvoupolohová regulace a spojitá regulace) a zobrazit skrze webovou aplikaci v místní síti důležité informace o teplotě. Obsažené jsou i popsané grafy z praktických testů regulace. Dále praktická část obsahuje důležité poznatky o automatické regulaci teploty v domácí udírně.

ABSTRACT

This thesis deals with conversion of a home smokehouse with manual temperature control into a smokehouse with automatic temperature control. The thesis contains theoretical treatise on thermometers used for automatization. This part is followed by a practical part where is description of the smokehouse before automatic temperature control and a description of the smoke after installation of necessary parts to allow automatization of temperature control. In this practical part there also is a guide on how to work in Mosaic development environment created by Czech company Teco a.s. The result of this thesis is a functional prototype of a home smokehouse with automatic temperature control. The control program of this smokehouse with automatic temperature control can switch between two ways of temperature control (two-position control and continuous control) and web application located in local network shows valuable information about the temperature. Thesis contains described graphs of practical test of temperature control. Furthermore, the practical part notes important discoveries about automatic temperature control in the home smokehouse.



KLÍČOVÁ SLOVA

Automatická regulace teploty, Mosaic, PID, hystereze, spojitá regulace, dvoupolohová regulace, PLC, Foxtrot.

KEYWORDS

Automatic temperature control, Mosaic, PID, hysteresis, continuous control, two-position control, PLC, Foxtrot.



2023

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

DRULÁK, Milan. *Regulace teploty v domácí udírně*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automatizace a informatiky, 2023, 68 s. Diplomová práce. Vedoucí práce: doc. Ing. Ivan Švarc, CSc.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval Ing. Urbanovi z firmy Teco, a.s. a Ing. Smyčkovi z firmy Micronic, s.r.o. za cenné rady při nastavení funkčního bloku PID11. Poděkování patří též mému vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Ivanu Švarcovi, CSc., za cenné rady a připomínky k této práci. Dále bych rád poděkoval své matce za přípravu masa pro uzení dle rodinného receptu.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, vypracoval jsem ji samostatně pod vedením vedoucího práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury.

Jako autor uvedené práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následku porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona c. 121/2000 Sb., včetně možných trestně právních důsledků.

V Brně dne 20. 5. 2023

.....

Milan Drulák

OBSAH

| | |
|--|-----------|
| STRUČNÁ CHARAKTERISTIKA PROBLEMATIKY ÚKOLU: | 2 |
| CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE: | 2 |
| SEZNAM DOPORUČENÉ LITERATURY: | 2 |
| 1 ÚVOD | 15 |
| 2 MĚŘENÍ TEPLoty V PRŮMYSLOVÝCH APLIKACÍCH | 17 |
| 2.1 Snímače určené pro měření teploty | 17 |
| 2.1.1 Snímače teploty | 17 |
| 2.1.2 Ostatní teploměry | 20 |
| 3 REALIZACE AUTOMATIZOVANÉ REGULACE V DOMÁCÍ UDÍRNĚ | 25 |
| 3.1 Uzení | 25 |
| 3.2 Konstrukce udírny s automatickou regulací teploty | 26 |
| 3.2.1 Stav udící soustavy před automatizací regulace teploty | 26 |
| 3.2.2 Ruční regulace teploty | 27 |
| 3.2.3 Přípravné práce pro automatizaci regulace teploty v udírně | 27 |
| 3.2.4 Automatická regulace teploty | 29 |
| 3.3 Součásti udírny s automatickou regulací teploty | 29 |
| 3.3.1 Řídicí centrála | 29 |
| 3.3.2 Teplotní čidlo | 51 |
| 3.3.3 Kouřovod | 52 |
| 3.3.4 Kouřovodová klapka | 52 |
| 3.3.5 Servomotor | 54 |
| 3.3.6 Udící komora | 55 |
| 3.3.7 Pec na dřevo | 55 |
| 3.3.8 Analyzátor spalin | 56 |
| 4 TESTY A ZHODNOCENÍ REGULAČNÍCH PROGRAMŮ | 57 |
| 4.1 Test regulace teploty programem s dvoupolohovým řízením | 57 |
| 4.2 Test regulace teploty programem se spojitým řízením | 58 |
| 4.3 Zhodnocení regulačních programů | 60 |
| 4.3.1 Ruční regulace teploty | 60 |
| 4.3.2 Dvoupolohové řízení pomocí hysterezního funkčního bloku Hyst31 | 60 |
| 4.3.3 Spojité řízení pomocí funkčního bloku PID11 | 61 |
| 5 ZÁVĚR | 63 |
| SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY | 65 |
| SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK | 67 |

1 ÚVOD

Tepelná úprava masných potravin je nedílnou součástí naší společnosti. Uzení je jednou z tepelných úprav masných výrobků, která v posledních letech nabírá na popularitě. Na trhu se nachází různé automatické udírny. Tyto automatické udírny používají jako palivo dřevěnou štěpku. Dřevěná štěpka je nejvhodnějším zdrojem paliva automatické udírny, protože umožňuje snadné automatické přikládání. Automatické udírny používající dřevěnou štěpku se dle mého názoru vychylují z tradiční koncepce uzení, která používá ve srovnání s dřevěnou štěpkou velké kusy dřeva vybraných stromů. Kusy dřeva vytváří žhavé uhlíky, jež jsou obecně vhodnějším palivem a zdrojem kouře pro uzení a při vkládání je přesně známa kvalita dřeva. Tradiční způsob uzení, i když zdoluhavý a nepřesný, je mnohými lidmi považován za nejlepší. Regulace teploty v tradiční domácí udírně je časově náročná a nepřesná činnost. Tato práce má za úkol automatizaci této činnosti, a tím i následné ulehčení celkového procesu uzení.

Automatizace regulace teploty stojí na multifunkční řídicí jednotce Foxtrot CP-2005 firmy Teco. Tato řídicí jednotka je schopná řídit žaluzie, osvětlení, zabezpečení objektů, měřit a regulovat teplotu. Možnost měření a regulace teploty je ideální pro tuto práci. Dále byla řídicí jednotka Foxtrot CP-2005 zvolena pro své programové prostředí, kterým je Mosaic. Toto prostředí umožňuje velký výběr z knihovných funkčních bloků, intuitivní implementaci funkčních bloků, vytváření grafů ve vestavěné funkci GraphMaker a snadné vytváření webových aplikací pomocí vestavěné funkce WebMaker. Pro regulaci teploty je třeba připojit periferní modul C-JC-0006M k řídicí jednotce Foxtrot CP-2005. Periferní modul C-JC-0006M ovládá servomotor napojený na kouřovodovou klapku.

Koncept automatické udírny byl navrhnout svépomocí a toto z něj dělá prototyp. Mnohé součásti této soustavy bylo třeba modifikovat, popřípadě vytvořit. Mezi modifikované součásti patří kouřovod, kouřovodová klapka, hřidel kouřovodové klapky, rozvaděčová skříň a potřebné modifikace samotné udíci komory (otvor pro teplotní čidlo, vývod kouřovodu a zastřešení pro servomotor).

Řídicí program byl tvořen a nastavován pomocí znalostí, které byly získány v předmětu 6AA. Konkrétně dvoupolohová a spojitá regulace. Dvoupolohová regulace teploty byla implementována skrze hysterezní funkční blok Hyst31, spojitá regulace byla implementována skrze funkci PID11. Spojením těchto hlavních funkcí a dalších funkčních bloků (logické funkce a porovnávací funkce) vznikne samotný řídicí program. Součástí řídicího programu je i uživatelsky přívětivá webová aplikace, ve které lze nastavit požadované teploty jak dvoupolohové, tak spojitě regulace a přepínat mezi těmito módy regulace. Webová aplikace též zobrazuje okamžitou teplotu v udírně a případné varování, pokud teplota příliš vzroste nebo klesne.

Důležitou částí této práce je závěrečné srovnání mezi ruční regulací, dvoupolohovou a spojitou automatickou regulací, které je vyhodnoceno. Vyhodnocování plyne čistě z experimentálních pokusů a jejich pozorování. V této části jsou detailně popsány grafy dvoupolohové a spojitě regulace teploty a zhodnocena jejich přesnost.

2 MĚŘENÍ TEPLOTY V PRŮMYSLOVÝCH APLIKACÍCH

2.1 Snímače určené pro měření teploty

Účelem teplotních snímačů je měření okamžité hodnoty teploty regulované veličiny a následně snímače tuto hodnotu převádějí na elektrický signál, který je použit při regulaci.

Nejrozšířenějšími typy snímačů v automatizaci jsou snímače, jež převádějí snímané veličiny na elektrický signál. Tyto snímače jsou tzv. elektrické snímače neelektrických veličin. Pro převod snímané veličiny na elektrický signál (napětí, proud, odpor) se využívá široké spektrum fyzikálních principů. Snímače se dále rozdělují na aktivní a pasivní.

Aktivní snímače vlivem neelektrické veličiny působí jako zdroj elektrické energie. Při těchto snímačích je častá přímá úměra mezi neelektrickou veličinou a elektrickým napětím.

Pasivní snímače používají pro vyhodnocení neelektrické snímané veličiny změnu elektrických vlastností. Tato změna v neelektrické snímané veličině způsobí změnu v elektrických vlastnostech. Dále je změna v elektrických vlastnostech vyhodnocována běžnými elektrickými principy.¹

2.1.1 Snímače teploty

Odporové snímače teploty

Pro měření teploty je využívána závislost odporu na teplotě elektrického materiálu. Tyto snímače využívají přednostně materiály čistých kovů (měď, nikl, platina) a polovodičové materiály.

Čidla odporových teploměrů se nazývají měřicí odpory.

Měření se dělí na metodu můstkovou a metodu kompenzační.

Můstková metoda – Tato metoda se dále dělí na výchylkovou můstkovou metodu a nulovou můstkovou metodu.

Výchylková můstková metoda je nejrozšířenější metodou pro měření odporu, tato metoda vyžaduje, aby byl můstek napájen stabilizovaným zdrojem.

Nulová můstková metoda je konstrukčně složitější, ale poskytuje vyšší přesnost měření.

¹ ŠVARC, Ivan, MATOUŠEK, Radek, ŠEDA, Miloš, VÍTEČKOVÁ, Miluše. *Automatické řízení*. Akademické nakladatelství CERM, VUT v Brně 2011, ISBN 978-80-214-4398-3., s. 267.

Kompenzační metoda – Měří se úbytek napětí na měřicím odporu, který se srovnává s úbytkem na speciálním etanolovém teploměru.

Odporové snímače teploty se dělí na iontové a krystalové.²

a) Iontové snímače teploty

K měření využívají náhlé změny elektrické vodivosti v oblasti fázové změny pevných elektrolytů. Čidlem iontových snímačů je elektrolytem vyplněná skleněná nádoba. V tomto elektrolytu jsou vloženy dvě platinové elektrody a přídatná topná jednotka, která udržuje teplotu v čidle na teplotě fázové přeměny.

Při změně teploty dochází ke změně mezi kapalnou a pevnou fází. Při zvýšení teploty se rozpadají krystaly. Tímto rozpadem se uvolňují ionty, které zapříčiní iontovou vodivost. Teplota se měří přepočtem z topného proudu.

Iontové snímače teploty pracují v teplotním rozmezí od 200 °C až do 700 °C s chybou měření v rozsahu od 0,5 % do 3 %.

b) Krystalové teploměry

Čidlo krystalografického snímače teploty je krystal specifického výbrusu. Tento krystal je zapojen v rezonančním obvodu tranzistorového oscilátoru. Krystal v tomto obvodu kmitá určitou frekvencí, která je závislá na teplotě. Tato frekvence kmitů se porovnává s frekvencí kmitů referenčního oscilátoru, jenž je tepelně nezávislý. Rozdíl kmitů je úměrný přírůstku teploty, a proto je indikátorem přímo zobrazována teplota ve °C. V teplotním rozsahu od -80 °C do 250 °C je kmitočet lineární závislostí teploty.

Krystalové snímače teploty dokážou rozeznat změnu teploty $1 \cdot 10^{-4}$ °C. Tato vysoká citlivost krystalových teploměrů se využívá v kryogenice, při ověřování teploměrů a v kalorimetrii.³

² HELEBRANT, František, MONI, Vlastimil, BLATA Jan. *Studijní podklady: Termografie*. Ostrava: Vysoká škola baňská – Technická univerzita Ostrava, 2010, s. 15.

³ HELEBRANT, František, MONI, Vlastimil, BLATA Jan. *Studijní podklady: Termografie*. Ostrava: Vysoká škola baňská – Technická univerzita Ostrava, 2010, s. 15.

Termoelektrické snímače teploty

Pro měření teploty používají tyto snímače termoelektrický jev. Materiál termoelektrických snímačů musí mít velký přírůstek termoelektrického napětí s rostoucí teplotou, odolnost proti vnějším vlivům (chemickým, mechanickým) a zachování svých vlastností při dlouhodobém provozu. Tento materiál je vždy slitina kovů (Fe-CuNi, NiCr-Ni). Pro vysokoteplotní měření se termoelektrické teploměry vyrábí ze slitin vzácných kovů (PtRh10-Pt, WRe5-WRe20).

Měření termoelektrického napětí

Toto napětí se měří dvěma způsoby, milivoltmetrem (výchylková metoda) nebo kompenzátořem (kompenzační metoda).

a) Výchylková metoda

Milivoltmetrem není měřeno termoelektrické napětí, ale úbytek napětí na obvodu. Tento úbytek je závislý na odporu obvodu termoelektrického článku a vnitřním odporu milivoltmetru.

b) Kompenzační metoda

Tato metoda měří termoelektrické napětí. Ve chvíli měření neprotéká obvodem termoelektrický proud, a proto dojde k úbytku napětí. Měřicí jednotkou je kompenzátoř, který má konstantní odpor a konstantní proud.

Termoelektrické články jsou tvořeny dvěma vodiči svařenými k sobě v jednom místě. Vodiče mají formu tenkého drátu. Drát obyčejných kovů má tloušťku 3,5 mm a drát vzácných kovů má tloušťku 0,35 mm. Dráty termoelektrického článku jsou od sebe izolovány a spojeny na svorkovnici v jednom místě článku.

Tyto články se umísťují do ochranných trubic. Termoelektrické teploměry se vyrábí jednoduché (jeden termočlánek) nebo dvojité (dva termočlánky).

Optovláknové snímače

Fungují s využitím změny vlastností optických vláken vlivem teploty. Změna teploty mění signál optického vlákna.

Složení optovláknového snímače

- Část optického vlákna určeného k měření. Požadavek na toto optické vlákno je tepelná citlivost. Měřicí optické vlákno je pokryto ochranným obalem.
- Vedení pro signál z optických vláken. Vedení musí mít malý útlum, proto je vyrobeno z křemenného skla. Vedení je uloženo v obalu z PVC.
- Elektrické konektory, které obsahují fotodiody, luminiscenční diody a optická vlákna.⁴

⁴ Helebrant, František, Vlastimil Moni a Jan Blata. *Studijní podklady: Termografie*. Ostrava: Vysoká škola baňská – Technická univerzita Ostrava, 2010, s. 14.

- Stabilizátor, který slouží pro ustálení elektrického proudu pro LED diodu.
- Zesilovač signálu senzoru.
Dle funkce se optovláknové snímače dělí na:
 - Refraktometrické snímače porovnávající index lomu okolního prostředí s indexem lomu optického vlákna.
 - Absorpční snímače fungují na principu pohlcování části světla, které se šíří optickým prostředím. Tento princip je teplotně závislý.
 - Polarizační snímače využívají teplotní závislosti natačení polarizační roviny světla. Měření probíhá na křemíkových čidlech.
 - Fluorescenční snímače se dělí na buzené a samobuzené. Fluorescenční látka je aplikována na konec měřicího optického vlákna. Tímto vláknem je vedeno ultrafialové záření, jež vyvolá fluorescenci ve viditelném spektru. Měří se teplotní závislost intenzity červeného a modrého, popřípadě zeleného, záření. Tyto intenzity dvou složek záření se dále porovnávají a z výsledného poměru je přepočtena teplota.
 - Snímače s rozprostřeným sledováním teploty sledují teplotu po délce optického vlákna. Měřicí vlákno se umísťuje podél měřeného objektu. Tyto snímače se využívají pro měření teploty plynů, ropovodů, kabelů vysokého a velmi vysokého napětí. Tyto snímače měří teplotu, a i polohu bodu. Měří se až několik tisíc bodů.

Nevýhodou optovláknových teploměrů je jejich vysoká cena a nutnost mikropočítačů pro vyhodnocování měřicích signálů. Pro obsluhu těchto teploměrů je třeba zaškolená obsluha.

2.1.2 Ostatní teploměry

Tyto teploměry se v automatizaci používají velmi složitě a zřídka.

Rozdělení teploměrů:

- Dilatační teploměry – měří na principu teplotní roztažnosti plynů, kapalin a pevných látek.
- Parní teploměry – měří za pomoci závislosti tlaku na teplotě. Jejich pracovní látkou je sytá pára teploměrové kapaliny.
- Pyrometry – tyto teploměry měří pomocí tepelného záření, které měřené těleso vysílá.⁵

⁵ HELEBRANT, František, MONI, Vlastimil, BLATA Jan. *Studijní podklady: Termografie*. Ostrava: Vysoká škola baňská – Technická univerzita Ostrava, 2010, s. 19.

Dilatační teploměry

Využívají teplotní roztažnosti všech skupenství. Dilatační teploměry se dále dělí na tyčové, bimetalické, skleněné a tlakové teploměry kapalinové.

a) Tyčové teploměry

Pro měření teploty využívají rozdílné roztažnosti trubice a vnitřní tyče. Trubice a vnitřní tyč je spojena v jednom místě.

Tyčové teploměry nachází využití v termostatech, kde slouží jako snímací zařízení dvoupolohových regulátorů teploty. Tyčové teploměry pracují v širokém spektru teplot, a to až do 1 000 °C. Výhodami tyčových teploměrů jsou jejich nízká pořizovací cena a robustní konstrukce. Nevýhodou těchto teploměrů je odchylka v přesnosti měření. Tato odchylka je cca 2 %.

b) Bimetalické teploměry

Pro měření teploty využívají kovové materiály s různou teplotní roztažností. Teploměr měří pomocí deformace kovových pásků. Tyto pásky jsou mezi sebou nehybně propojeny. Výhodami bimetalických teploměrů jsou jejich nízká pořizovací cena, snadná údržba a robustní konstrukce. Nevýhodami jsou pomalá tepelná odezva a potřeba prohřátí jak vnější trubice, tak i stočených bimetalických pásků uvnitř.

c) Skleněné teploměry

Pro měření teploty využívají objemovou roztažnost teploměrové kapaliny ve skle. Teploměřová kapalina s rostoucí teplotou zvětšuje svůj objem. Přírůstek objemu se odečítá v kapiláře teploměru. Většina skleněných teploměrů má prostor nad teploměrovou kapalinou vyvakuován. Vysokoteplotní rtuťové teploměry mají prostor nad teploměrovou kapalinou vyplněn inertním plynem. Nejrozšířenějšími skleněnými teploměry jsou teploměry s rtuťovou teploměrovou kapalinou. Rtuť poskytuje výhodné fyzikální vlastnosti pro měření teplot (dobrá tepelná vodivost a nesmáčivost). Výhodami skleněných teploměrů jsou jejich jednoduché konstrukční řešení, přesnost, spolehlivost měření a nízké pořizovací ceny. Nevýhodami jsou křehkost a možné nesprávné odečtení měřené teploty.

d) Tlakové teploměry kapalinové

Tyto teploměry se skládají z teploměrové nádoby, přístroje na měření a spojovací kapiláry. Teploměr je vyplněn teploměrovou kapalinou (nejčastěji rtuť, popřípadě organickými látkami).⁶

⁶ HELEBRANT, František, MONI, Vlastimil, BLATA Jan. *Studijní podklady: Termografie*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2010, s. 10.

Pro správnou funkci tlakového teploměru kapalinového musí být jeho teploměrová kapalina stále v kapalném stavu, tzn. teplota nikdy nesmí překročit bod varu dané teploměrové kapaliny. Změna teploty vyvolá změnu objemu. Tato změna objemu se převádí na změnu tlaku. Změna tlaku je zaznamenána a vyhodnocena deformačním tlakoměrem.

Tlakové teploměry kapalinové se používají v zhoršených provozních podmínkách. Tyto teploměry se využívají ke dvoupolohové regulaci teploty a k dálkovému měření teploty.

Výhodami těchto teploměrů jsou jejich lineární stupnice, rozsáhlé měřicí pásmo (do 600 °C) a jejich robustní konstrukce.

Podstatnou nevýhodou je nutnost provádět opravy a korekce na okolní teplotu a změnu hydrostatického tlaku při výškově rozdílném umístění měřicího přístroje a teploměrové nádoby.

e) Tlakové teploměry plynové

Teploměry měří za využití principu izobarického jevu. Za stálého tlaku se s měnící se teplotou mění objem. Tlakové teploměry plynové udávají teplotu na velmi rozsáhlé stupnici, a to od -260 °C do 800 °C. Výhodou těchto teploměrů je využití lineární stupnice a jejich kompaktní velikost (teploměřová nádoba má objem cca 1 cm³. Mezi další kladné vlastnosti těchto teploměrů patří jejich vysoká přesnost měření, značná odolnost vůči nepříznivým vlivům prostředí a dlouhodobá stabilita měření. Nevýhodou tohoto typu je vysoká pořizovací cena.

f) Tlakové teploměry parní

Konstrukční provedení je velmi podobné tlakovým teploměrům kapalinovým. Tlakoměr těchto teploměrů měří v rozsahu stovek kPa. Teploměřová nádoba se plní pouze z části a nad naplněnou částí je sytá pára dané kapaliny.

Tlakové parní teploměry měří do 400 °C. Tyto teploměry mají malý rozsah minimální a maximální teploty, kterou jsou schopné měřit. Rozdíl minimální a maximální teploty, kterou jsou schopné měřit je 50 °C až 100 °C. Hlavní použití nachází tlakové parní teploměry v průmyslu, kde slouží k signalizaci a měření teploty agresivních látek.⁷

⁷ HELEBRANT, František, MONI, Vlastimil, BLATA Jan. *Studijní podklady: Termografie*. Ostrava: Vysoká škola baňská – Technická univerzita Ostrava, 2010, s. 11.

Pyrometry

Pyrometry využívají tepelného záření v různých oblastech vlnového spektra pro měření teploty.

Pyrometry se dělí na:

a) Úhrnné pyrometry

Měří teplotu na základě Stefan-Boltzmannova zákona, vyhodnocují tepelné záření v celém spektru vlnových délek. Tepelný monitor z důvodu potřeby měřit tepelné záření v celém spektru je měřicím čidlem. Zářivý tok je zaostřen pomocí čoček na tepelný detektor. Tyto čočky jsou z materiálu, který má široké spektrum prostupnosti. Úhrnné teploměry měří objekty se zjednodušením. Objekty se považují za dokonale černá tělesa ($\varepsilon=1$). Skutečná teplota bude vždy vyšší než změřená teplota.

Z tohoto důvodu je třeba korekce měřených údajů. Tato korekce je obtížná, proto se používají zářiče, které se co nejvíce blíží k černému tělesu.

Tepelné záření se soustřeďuje objektivem na detektor, jenž ovlivňuje rozsah měřených teplot. Úhrnné teploměry měří v rozsahu $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $5\ 000\text{ }^{\circ}\text{C}$.

b) Monochromatické pyrometry

Tyto pyrometry jsou spektrálně selektivní pyrometry, které měří teplotu na povrchu tělesa v určitém rozsahu vlnových délek. Monochromatické pyrometry měří teplotu s pomocí záření v úzkém pásmu vlnových délek (od 10 nm do jednotek mikrometrů). Výraznou výhodou je rychlá reakce teploměru na změnu teploty.

Další výhodou těchto teploměrů je jejich schopnost měřit teplotu na velmi malých objektech. U těchto teploměrů je třeba provádět korekturu měřené teploty.

c) Poměrové pyrometry

Poměrové pyrometry detekují dvě záření při dvou vlnových délkách a následně tyto rozdílné záře uvedou do poměru.

U těchto pyrometrů je třeba kalibrace. Tato kalibrace probíhá při tzv. teplotě spektrálního složení. Poměr záření dvou vlnových délek u měření stejného tělesa musí být stejný jako poměr září reálného tělesa.

d) Vícepásmové pyrometry

Nejistota měření je zmenšována využitím trojpásmového pyrometru, jenž vyhodnocuje poměr měřených veličin. Poté je za specifických podmínek zajištěna nezávislost emisivity na poměru záření.⁸

⁸ HELEBRANT, František, MONI, Vlastimil, BLATA Jan. *Studijní podklady: Termografie*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2010, s. 20.

e) Pyrometry s automatickou korekcí emisivity

Tyto pyrometry měří teplotu, aniž by byla potřeba známá emisivita daného objektu. Jeden z těchto principů je měření monochromatickým pyrometrem, při kterém je měřený objekt ozařován laserem s přesně definovanou září.

f) Pyrometry s optickými vlnovody v infračervené oblasti

Optický vlnovod slouží k vedení elektromagnetických vln o vysokých frekvencích. Při měření je třeba uvažovat pokles zářivého toku ve vlnovodu. Tyto ztráty jsou způsobeny absorpcí v prostředí tvořené vlnovodem, rozptylem indexu lomu vlivem nehomogenit. Další ztráty jsou způsobeny vyzařováním na ohybech vlnovodu.

Optické vlnovody se používají pro přenos fotonového toku z místa, které není v zorném poli pyrometru za předpokladu, že není možné pyrometr umístit do blízkosti měřené plochy, z důvodu vysoké, popřípadě nízké, teploty, přítomnosti explozivního prostředí, radioaktivního prostředí, silného elektromagnetického záření, anebo přítomnosti chemicky agresivního prostředí.

Výhodou těchto pyrometrů je mechanická pevnost, pružnost a délka vlnovodů, možnost měření teploty zpětným světelným tokem.⁹

⁹ HELEBRANT, František, MONI, Vlastimil, BLATA Jan. *Studijní podklady: Termografie*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2010, s. 21.

3 REALIZACE AUTOMATIZOVANÉ REGULACE V DOMÁCÍ UDÍRNĚ

3.1 Uzení

Uzení je proces, ve kterém je potravinový výrobek konzervován, vysušován a tepelně upravován kouřem. Potravinový výrobek je vystaven kouři z žhavých uhlíků. Uzení masných výrobků se dále dělí na teplé a studené uzení.

Studené uzení je časově velmi náročné uzení při studených teplotách. Teploty studeného uzení se pohybují okolo 30 °C. Proces studeného uzení probíhá několik dní s určitými přestávkami. Tento proces ve své podstatě představuje sušení masného výrobku, který byl před uzením naložen do soli. Při tomto uzení masný výrobek ztrácí okolo 30 % své hmotnosti.¹⁰

Teplé uzení masa je časově méně náročné. Masný výrobek se obecně udí 5 až 12 hodin, ale dle domácího postupu bylo odzkoušeno, že nejchutnější masný výrobek vznikne uzením po dobu přibližně 24 hodin. Tato doba uzení je rozložena mezi dva dny. Každý den je masný výrobek uzen přibližně 12 hodin. Je důležité, aby masný výrobek byl před uzením naložen. Po teplém uzení si masný výrobek zachovává více své šťavnatosti. Teplé uzení probíhá při teplotě pohybující se mezi 60 °C až 70 °C. V této práci se masný výrobek udil teplým kouřem, který byl regulován na 70 °C.

Při teplém uzení je důležité i použité palivo. Pro zachování kvality masného výrobku je třeba, aby bylo dřevo bukové, dubové, třešňové nebo švestkové. Dřevo z jehličnanů způsobuje hořkou chuť konečného masného produktu, proto se nepoužívá. Volba dřeva ovlivňuje obsah škodlivin, barvu a chuť výsledného masného výrobku. Pro minimalizaci škodlivin byla zvolena kombinace dubového a bukového dřeva. Palivové dřevo je dále nutné zkontrolovat, aby neobsahovalo hnilobu a plísně, které by znehodnocovaly konečný masný výrobek. Důležitým krokem je odstranění kůry a případného prachu, který na dřevě může být.

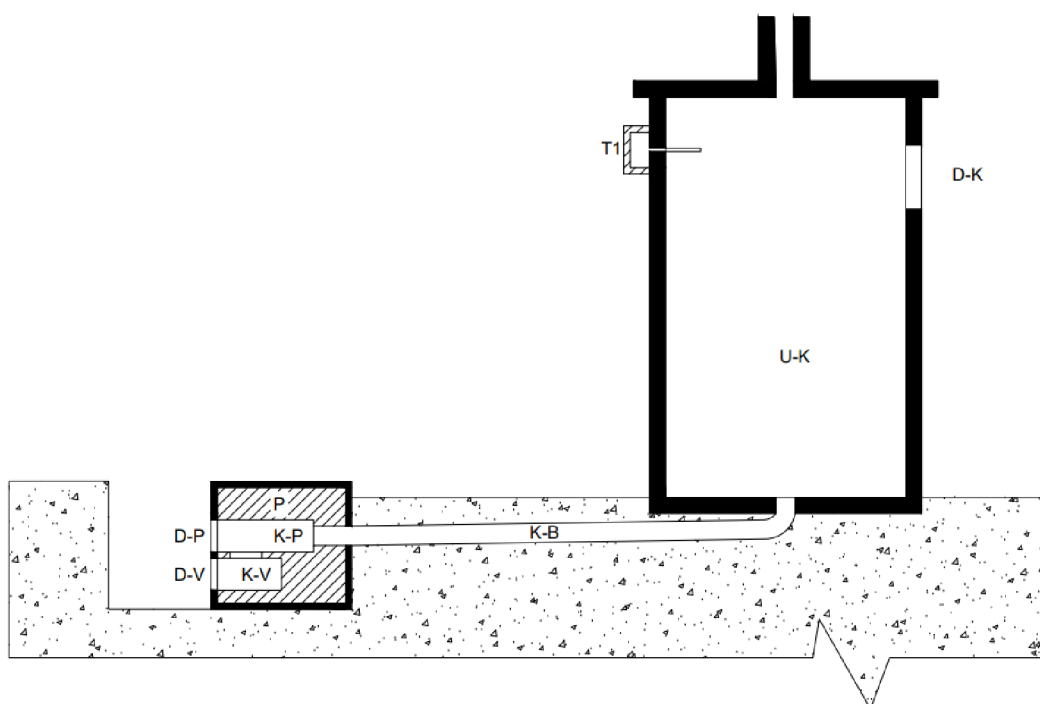
¹⁰ *Nakládání a uzení masa.* [online]. [cit. 2023-05-02] Dostupné z: <https://www.udirny.cz/o-uzeni/nakladani-a-uzeni-masa/?fbclid=IwAR0FwBq5jDaarXWLn5FhAjf8P0DytbsKBz02cWXbgaHMyUAkLSpOeFP-39c>

3.2 Konstrukce udírny s automatickou regulací teploty

Udírna má konstrukci tradiční udírny (pec na dřevo, kouřovod, udící komora), která se liší od automatizovaných udíren tím, že palivem jsou kusy dřeva v celku namísto dřevěné štěpky. Na trhu se nachází rozmanité modely automatických udíren používající štěpku jako palivo, ale v této práci byl navrhnout prototyp domácí udírny s automatickou regulací teploty využívající kusy dřeva.

3.2.1 Stav udící soustavy před automatizací regulace teploty

Udící soustava před automatizací obsahovala pec na dřevo, betonový podzemní kouřovod, udící komoru a udírenský teploměr.



Obr. 1: Schéma domácí udírny

Popis schématu

- U-K – udící komora
- D-K – vkládací dveře do udící komory
- P – pec na dřevo
- K-P – příkladací komora pece
- K-V – vzduchová komora pece
- D-P – dveře příkladací komory pece
- D-V – dveře vzduchové komory pece
- K-B – betonový kouřovod
- T1 – mechanický udírenský teploměr

3.2.2 Ruční regulace teploty

Ruční regulace byla zprostředkována otevíráním a zavíráním spodní komory pece na dřevo a otevíráním a zavíráním vkladacích dveří udíací komory. Ruční uzení bylo časově náročné a nepřesné. Veškeré teplotní změny bylo třeba blízce pozorovat a predikovat změny teploty v udíací komoře.

Při rostoucí teplotě byly přiměřeně přivřeny dveře spodní komory pece na dřevo a otevřeny vkladací dveře udíací komory. Přivření dveří spodní komory pece na dřevo přidusilo oheň, a tím zapříčinilo postupné ochlazení udíací komory. Otevření vkladacích dveří udíací komory zapříčinilo okamžité ochlazení komory.

Při klesající teplotě bylo potřeba ověřit stav horní komory. Při nedostatku paliva bylo nutné přidat dřevo a otevřít dveře spodní komory pece na dřevo. Zároveň s otevřením dveří spodní komory na dřevo bylo nutné uzavřít vkladací dveře udíací komory. Tato konfigurace zajistila největší průchod vzduchu a rychlejší rozhoření přidaného dřeva. Po dostatečném rozhoření dřeva bylo třeba znovu ověřit teplotu. Pokud při přikládání teplota vzroste přes přijatelnou hodnotu, je třeba provést výše zmíněné kroky ke snížení teploty. Při teplotě v požadovaném teplotním rozmezí lze soustavu ponechat v aktuální konfiguraci.

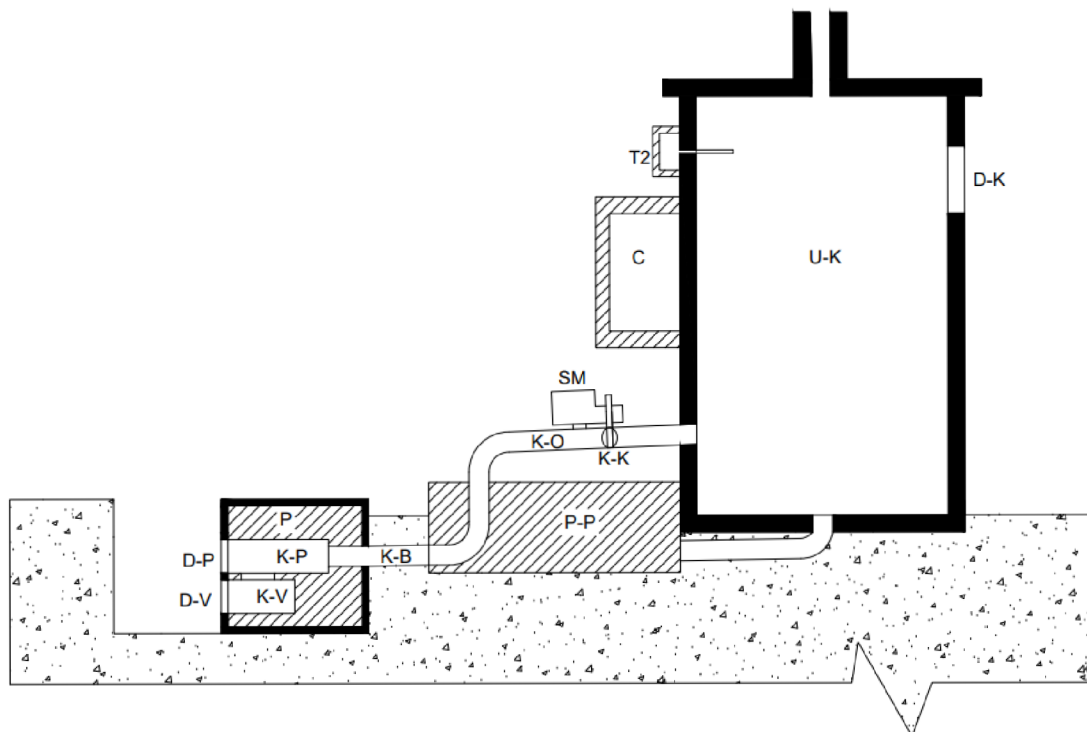
3.2.3 Přípravné práce pro automatizaci regulace teploty v udírně

Prvním krokem pro implementaci automatické regulace teploty z ruční regulace byl převod kouřovodu z podzemního betonového na nadzemní kovový. Podzemní kouřovod se nacházel 25 cm pod úrovní povrchu. Po odhalení betonového kouřovodu byl úhlovou bruskou na betonu vytvořen výřez pro napojení kovového kouřovodu. Kovový kouřovod byl zvolen takového průměr, aby šel vsunout do betonového kouřovodu. Napojovacím elementem na betonový kouřovod byl tvarový prvek kolena. Toto první koleno vede kouř kolmo nahoru. Po upevnění kolena byla vytvořena betonová patka na místě výkopu. Druhé kovové kouřovodové koleno navádí kouř mírným vstoupáním do kouřovodu s ovládací klapkou. Do udírny byl dále vyříznut otvor oválného tvaru pro možnost manipulace s kouřovodem obsahujícím ovládací klapku. Při vsunutí kouřovodu s ovládací klapkou byl oválný otvor utěsněn uzávěrem, aby neunikal kouř do okolí.

Následovně byl vyvrtán otvor na pouzdro pro stonkové teplotní čidlo. Toto pouzdro bylo zašroubováno do udírny a při přípravě na uzení se do pouzdra zasunulo stonkové teplotní čidlo.

Řídící centrála je připevněna na normovanou U lištu společně s napájecím modulem a s periferním modulem. Normovaná U lišta je přišroubovaná k odnímatelné základně. Tato konfigurace umožňuje snadnou manipulaci s elektrickými kabely. Elektrické kabely jsou vedeny do svorkovnice. Svorkovnice slouží k usnadnění odpojení a připojení vnějších elektrických kabelů (elektrický kabel vedoucí k teplotnímu čidlu, elektrický kabel vedoucí k servomotoru, elektrický kabel propojující napájecí modul s elektrickou sítí). Základna je vložena do distribuční skříně se stupněm ochrany IP67

(kompletní ochrana před vnějším prostředím). Distribuční skříň je odnímatelně připevněna ke straně udírny.



Obr. 2: Schéma udírny s automatickou regulací teploty

Popis schématu

- U-K – udící komora
- D-K – vkládací dveře do udící komory
- P – pec na dřevo
- K-P – příkladací komora pece
- K-V – vzduchová komora pece
- D-P – dveře příkladací komory pece
- D-V – dveře vzduchové komory pece
- K-B – betonový kouřovod
- T2 – teplotní stonkové čidlo
- C – centrální řídicí jednotka
- SM – servomotor
- P-P – podpurná betonová patka
- K-O – ocelový kouřovod
- K-K – kouřovodová klapka

3.2.4 Automatická regulace teploty

Při automatické regulaci teploty uzení je stále třeba prvotního rozehrání udírny uživatelem a občasného přidání paliva do pece na dřevo. Automatickou regulaci lze sepnout již před prvotním rozehríváním udírny. Po tomto rozehrání udírny přebírá kontrolu nad teplotou uživatelem zvolený regulační program. Při nedostatku paliva se na monitorovací aplikaci zobrazí varování nabádající uživatele k přidání paliva do pece na dřevo. Po zvýšení teploty varování zmizí a proces uzení je dále řízen automaticky.

Proces uzení končí uživatel. Pokud uživatel usoudí, že uběhla dostatečně dlouhá doba uzení a uzený produkt je hotov, nechá i přes varování monitorovací aplikace udící komoru dohořet. Tento doběh je nutný pro bezpečnou manipulaci s produktem i se samotnými částmi udírny. Při příliš brzké manipulaci může dojít k újmě na zdraví, a to konkrétně k popálení.

3.3 Součásti udírny s automatickou regulací teploty

Udící soustava se skládá z udící komory, pece na dřevo, kovového kouřovodu, kovové kouřovodové ovládací klapky, servomotoru, teplotního čidla a samotné rozvaděčové skříně s řídicí centrálou.

Kovová kouřovodová ovládací klapka, servomotor, teplotní čidlo a rozvaděčová skříň je odnímatelná. Montáž a demontáž těchto odnímatelných komponent je časově i manuálně nenáročná. Tato koncepce byla zvolena z důvodu zabezpečení drahé elektroniky, když udírna není v provozu a usnadnění údržby.

3.3.1 Řídicí centrála

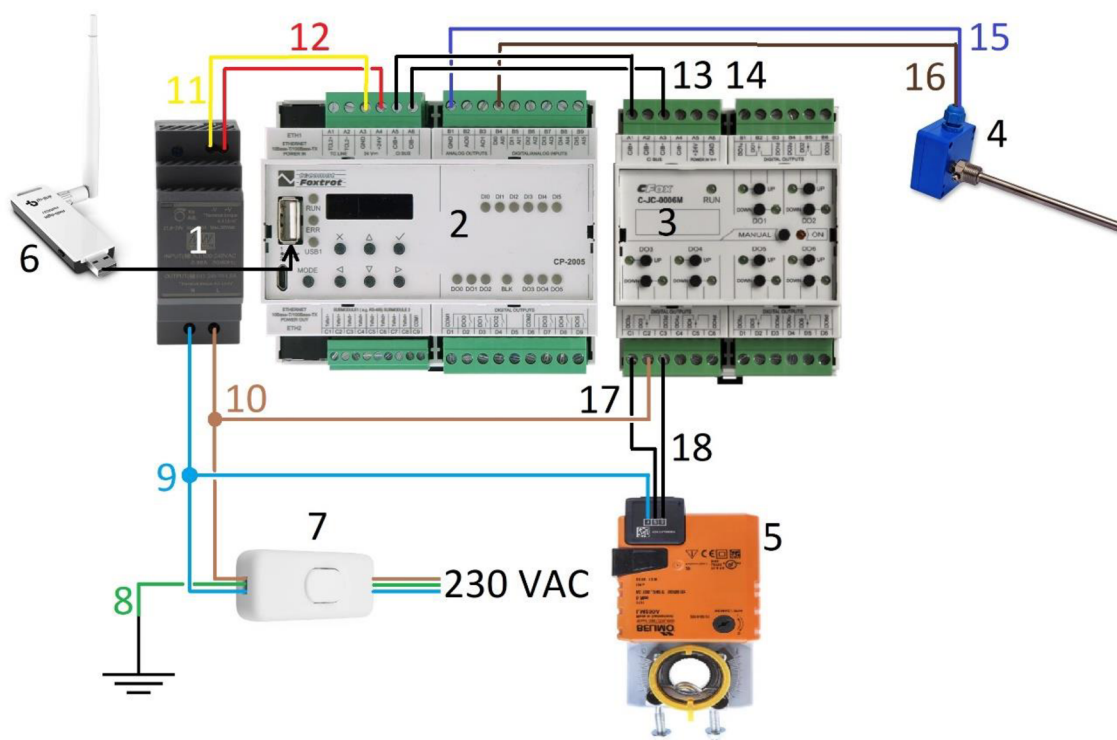
Řídicí centrálou udící soustavy je programovatelný automat značky Teco. Pro toto řízení byla zvolena řídicí jednotka Tecomat Foxtrot CP-2005. Tento automat byl vybrán pro kompaktnost a velkou variabilitu přípojných periferních systémů. Řídicí centrála je připojena k místní síti pomocí wifi adaptéru. Propojení je využito pro monitorování a nastavení parametrů a režimu regulace teploty. Připojení umožňuje i vzhled do časového vývoje teploty ve vývojovém prostředí. Pro ovládání servomotoru byl zvolen modul C-JC-0006M. Periferní modul je propojen pomocí CIB sběrnice. Elektrická síť je vedena do napájecího modulu HDR-30-12 Mean Well. Napájecí modul je propojen s řídicí jednotkou Tecomat Foxtrot CP-2005 a s jejím periferním modulem. Dále je k řídicí jednotce připojen Wifi USB adaptér TP-Link TL-WN722N, který je konkrétně doporučen firmou Teco. Tento Wifi adaptér umožňuje připojení řídicí jednotky k místní síti, a tím velmi usnadňuje a ulehčuje instalaci udírny. Řídicí centrála je vložena do rozvaděčové skříně se stupněm krytí IP65 pro ochranu citlivých součástí před vnějšími vlivy.

Obr. 3: Řídicí jednotka Tecomat Fox Trot CP-2005¹¹Obr. 4: Periferní modul C-JC-0006M¹²

¹¹ [TXN12005_CP-2005_11NSNN_F01_800]. In: Tecomat.cz [online]. 4. května 2023 [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://catalog.tecomat.cz/produkt/cp-200511nsnn>

¹² [thumb_cc9663e9ac964b64ae2f844e72c19b19_540x400_auto]. In: Tecomat.cz [online]. 4. května 2023 [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://catalog.tecomat.cz/produkt/c-jc-0006m>

Zapojení řídicí centrály

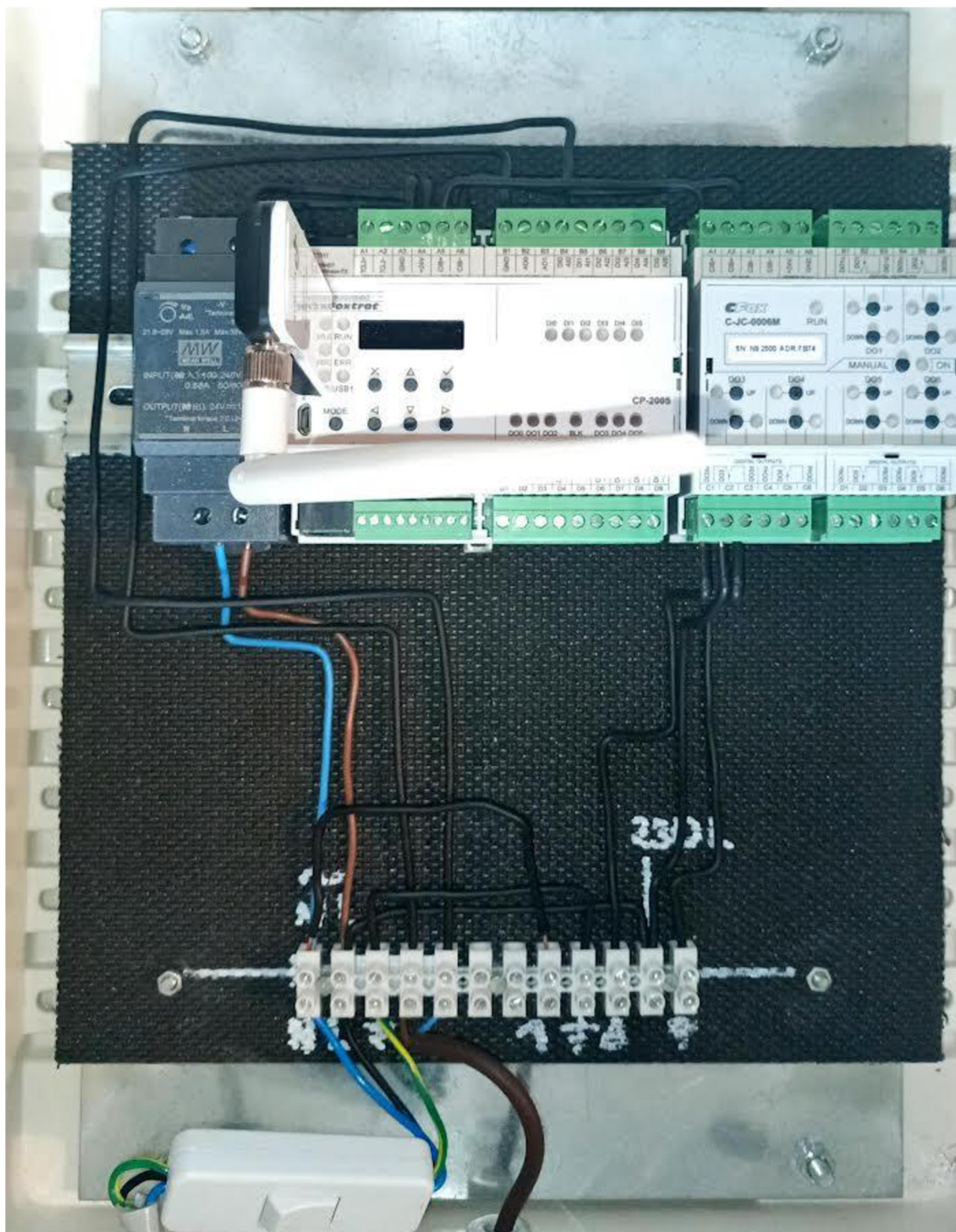


Obr. 5: Schéma zapojení řídicí centrály

Popis schématu

- 1 – Napájecí modul HDR-30-12 Mean Well. Tento modul převádí střídavý proud ze sítě na stejnosměrný, se kterým pracuje řídicí jednotka.
- 2 – Řídicí jednotka Foxtrot CP-2005. V tomto PLC automatu je nahrán řídicí program.
- 3 – Periferní modul C-JC-0006M. Periferní modul slouží k ovládání servomotoru.
- 4 – Teplotní čidlo Regmet Pt1000 slouží k snímání teploty uvnitř udící komory.
- 5 – Servomotor Belimo LM 230 A. Tento servomotor ovládá kouřovodovou klapku.
- 6 – Wifi USB adaptér TP-Link TL-WN722N umožňující připojení k Wi-Fi síti bez použití ethernetového kabelu.
- 7 – Vypínač, který připojuje celou soustavu pro automatickou regulaci do elektrické sítě.
- 8 – Kabel uzemnění, jenž zabezpečuje celou soustavu v případě elektrického zkratu.
- 9 – Nulový vodič spojující elektrickou síť s napájecím modulem a servomotorem.
- 10 – Vodič vedení fáze spojující elektrickou síť s napájecím modulem a periferním modulem.
- 11 – Vodič země pro modul. Tento vodič spojuje napájecí modul a řídicí jednotku.
- 12 – Vodič stejnosměrného napětí 24 V, který napájí řídicí jednotku.

-
- 13,14 – Tyto vodiče slouží jako sběrnice typu CIB (Common Instalation Bus) specificky vytvořené firmou Teco pro účel komunikace s periferními moduly CFox. V této konfiguraci propojují řídicí jednotku Foxtrot CP-2005 s periferním modulem C-JC-0006M.
 - 15 – Vodič země pro modul spojující řídicí jednotku Foxtrot CP-2005 a teplotní čidlo Regmet Pt1000.
 - 16 – Tento vodič zajišťuje spojení mezi analogovým vstupem do řídicí jednotky Foxtrot CP-2005 a teplotním čidlem Regmet Pt1000.
 - 17 – Vodič spojující periferní modul C-JC-0006M a servomotor Belimo LM 230 A zajišťující zavírání kouřovodové klapky.
 - 18 – Vodič spojující periferní modul C-JC-0006M a servomotor Belimo LM 230 A zajišťující otevírání kouřovodové klapky.



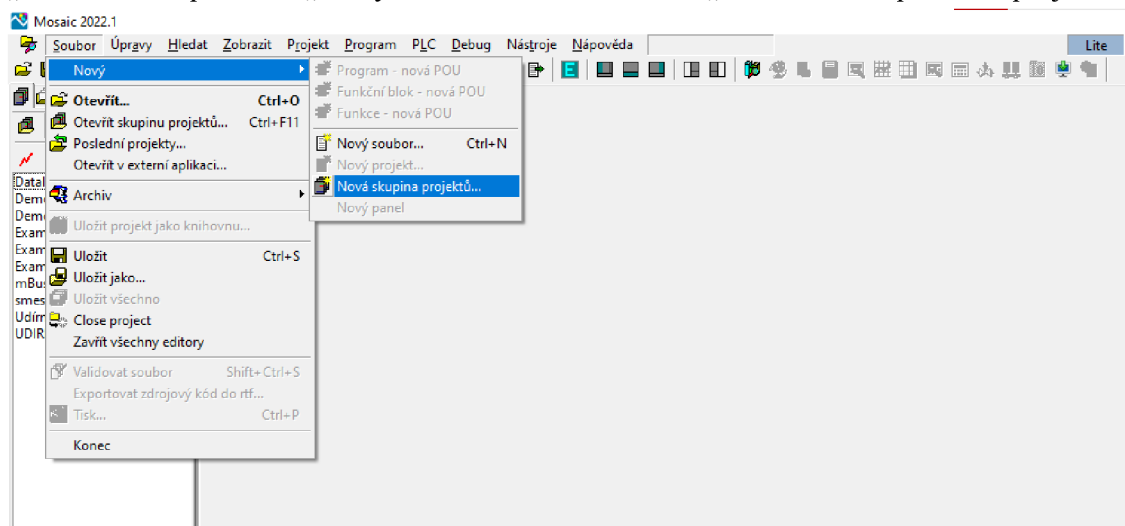
Obr. 6: Současné zapojení řídicí centrály

Vývoj řídicího programu

Řídicí program byl vytvořen v programovém prostředí Mosaic. V prostředí Mosaic se vytváří a ladí programy pro programovatelné logické systémy (PLC, Programmable Logic Controller) firmy Teco. Toto prostředí primárně pracuje s programovými organizačními jednotkami (POU, Programmable Organisation Unit). Těmito jednotkami se rozumí funkce, funkční bloky, a i samotný program. Prostředí Mosaic dává uživatelům možnost programovat jak v grafickém, tak i textovém jazyku. Při vývoji řídicího programu udírny se využívaly obě programovací metody. Grafické programové prostředí je velmi intuitivní. Funkční bloky se přemísťují z knihovny přímo na pracovní plochu. Propojování jednotlivých vstupů, výstupů a funkčních bloků lze docílit jednoduchým „tažením“ spoje z jednoho žádaného konce do druhého. Vývojové prostředí Mosaic disponuje integrovanou knihovnou funkčních bloků, a i tvůrcem WebMaker, který slouží k vytváření webových aplikací.

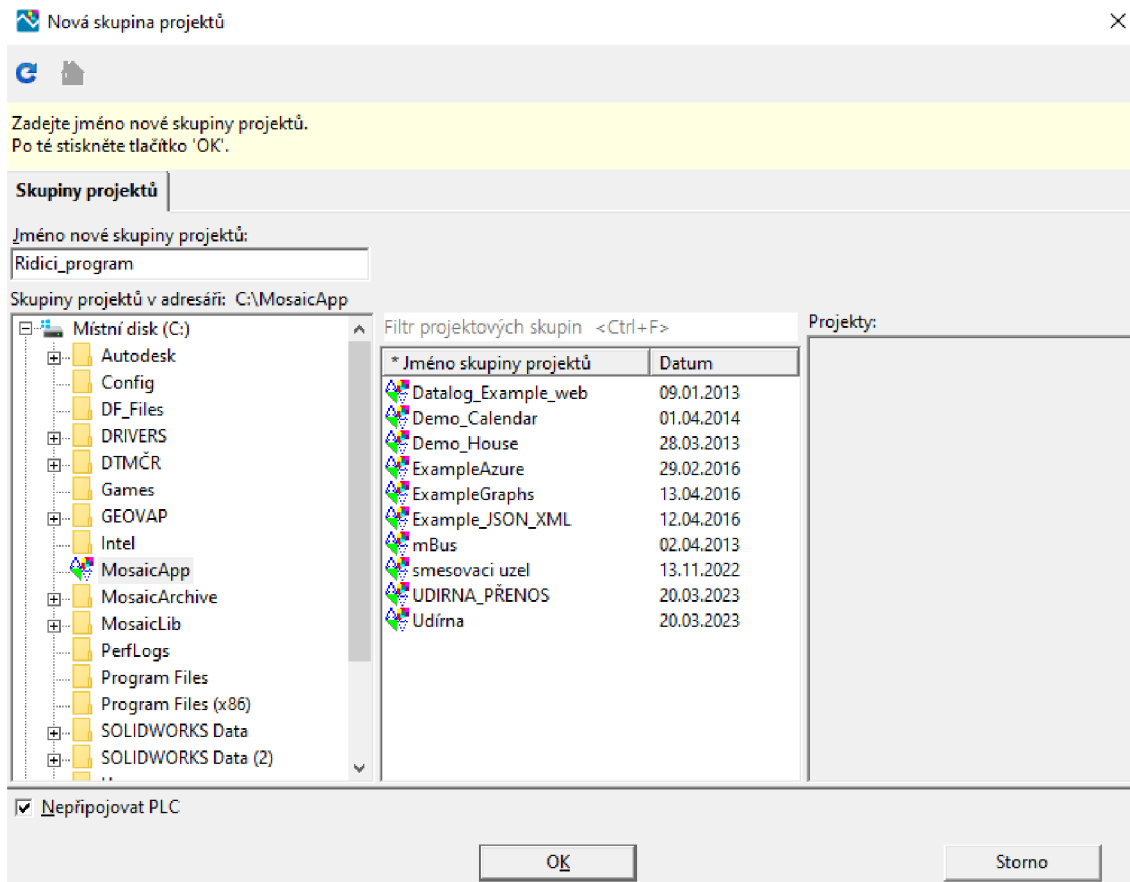
Zavedení nové skupiny projektů

Prvním krokem při tvoření řídicího programu bylo samotné založení skupiny projektů. K možnosti „Nová skupina projektů“ se uživatel dostane skrze navigaci na panel „Soubor“ poté „Nový“ a konečně „Nová skupina projektů“.



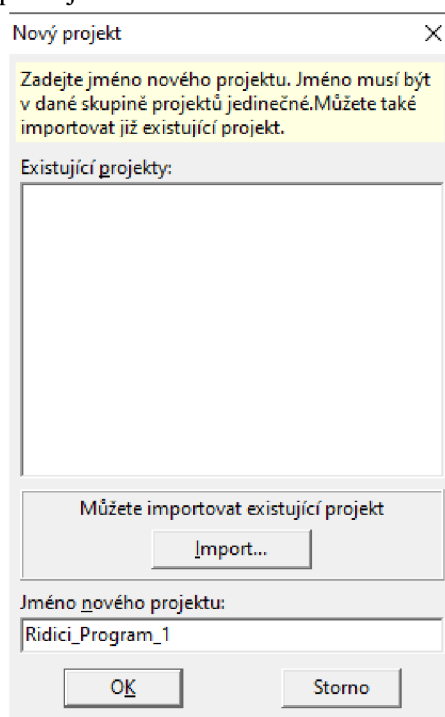
Obr. 7: Zavádění nové skupiny projektů ve vývojovém prostředí Mosaic

Nyní je třeba zvolit název nového projektu a při práci s odpojeným PLC je třeba zvolit možnost v levém dolním rohu „Nepřipojovat PLC“. V tomto případě je zvolen název Ridici_program.



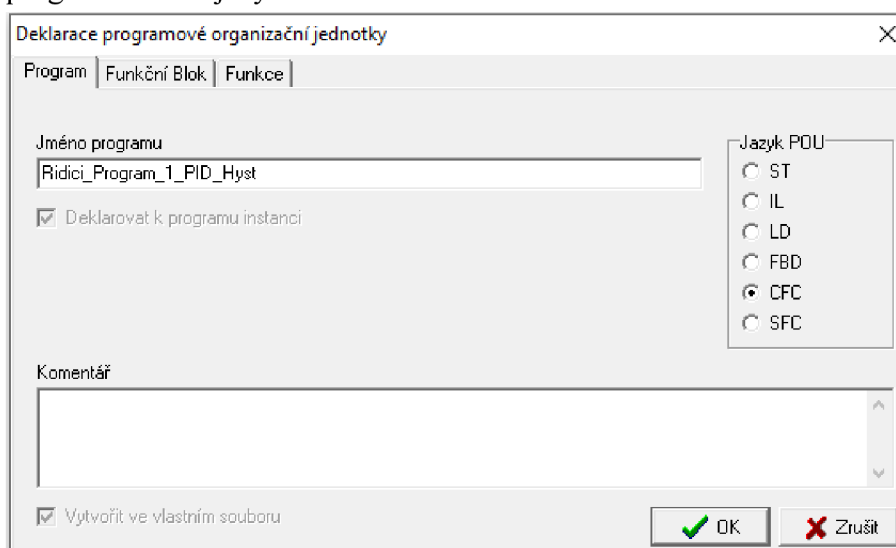
Obr. 8: Zavedení nové skupiny projektů

Po založení nové skupiny projektů se pojmenuje nový projekt. Nový projekt bude pojmenován `Ridici_Program_1`, aby se uživatel mohl jasně orientovat ve verzi projektu řídicího programu, se kterým pracuje.



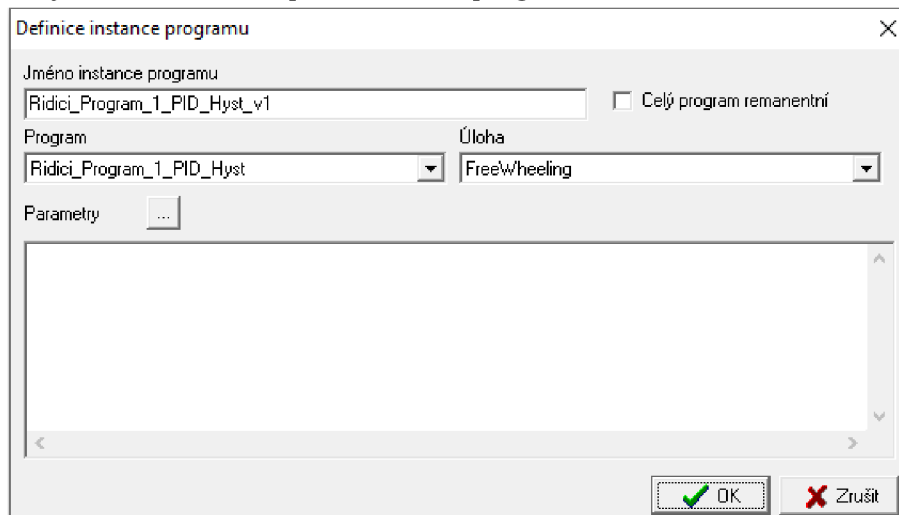
Obr. 9: Pojmenování nového projektu

Po vytvoření nového projektu se zvolí název programu. Tento program v sobě obsahuje řízení pomocí funkčního bloku PID11 a hysterezního funkčního bloku Hyst31, proto je pojmenovaný `Ridici_Program_PID_Hyst`. V pravé části se nachází volba jazyka. V této možnosti byl zvolen typ CFC. Zvolením CFC se bude vývoj programu odehrávat v grafickém programovacím jazyce.



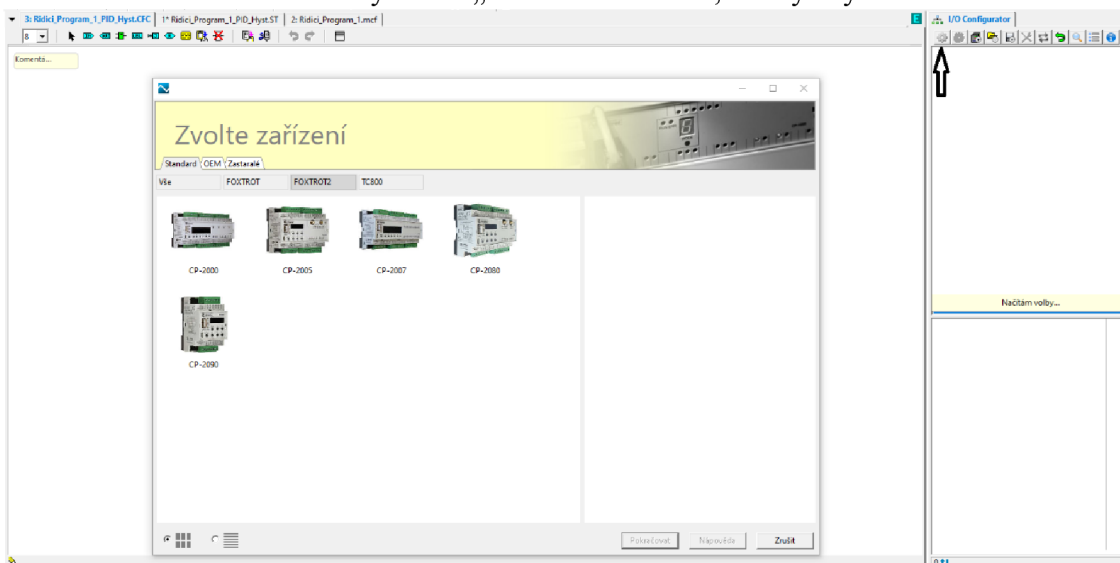
Obr. 10: Pojmenování programu a volba jazyku POU

Poté již stačí definovat první instanci programu.



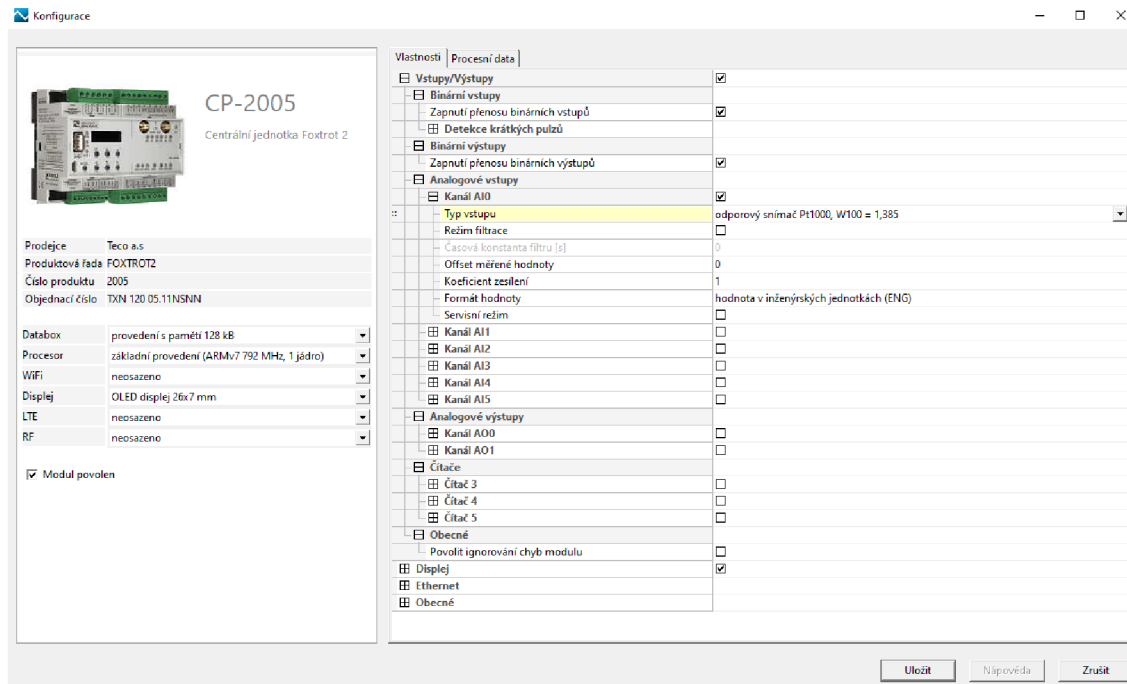
Obr. 11: Zavedení první instance programu

Nyní je zaveden program a projekt. Pro další programování je nutné zvolit model PLC, který je zapojeno do soustavy. Tato práce využila PLC Teco CP-2005. V pravém horním rohu se nachází symbol „ozubeného kola“, který vyvolá volbu zařízení.



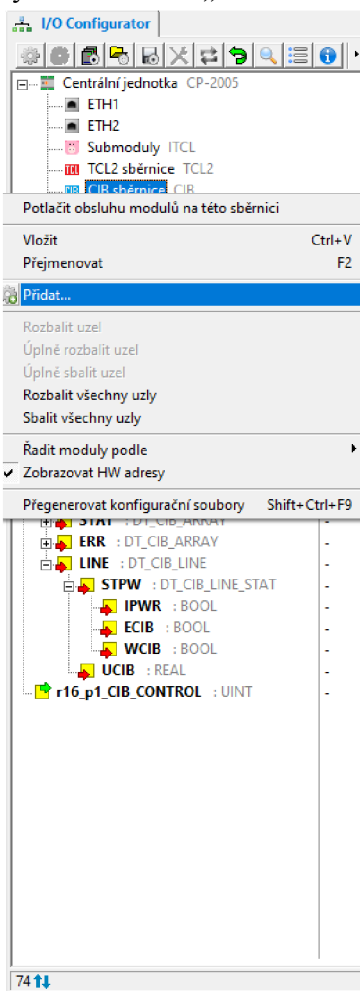
Obr. 12: Volba modelu PLC v regulované soustavě

Po zvolení PLC se zobrazí okno s názvem „Konfigurace PLC“. Toto okno slouží pro bližší specifikování konfigurace modulů. Po navolení konfigurace PLC je třeba uložit nastavení. V tomto kroku se zvolí analogový vstupní kanál pro teploměr Regmet Pt-1000.



Obr. 13: Specifikace centrální jednotky

Dalším krokem je přiřazení periferních modulů. Tato práce využívá periferní modul C-JC-0006M připojený na CIB sběrnici. Modul C-JC-0006M byl použit pro jeho schopnost tříbodového ovládání (otevírá, klid, zavírá) a jeho bezpečnostní opatření, které zamezuje současnému spuštění obou výstupů. V pravé části programu je třeba zvolit pravým tlačítkem CIB sběrnici a vybrat možnost „Přidat...“.



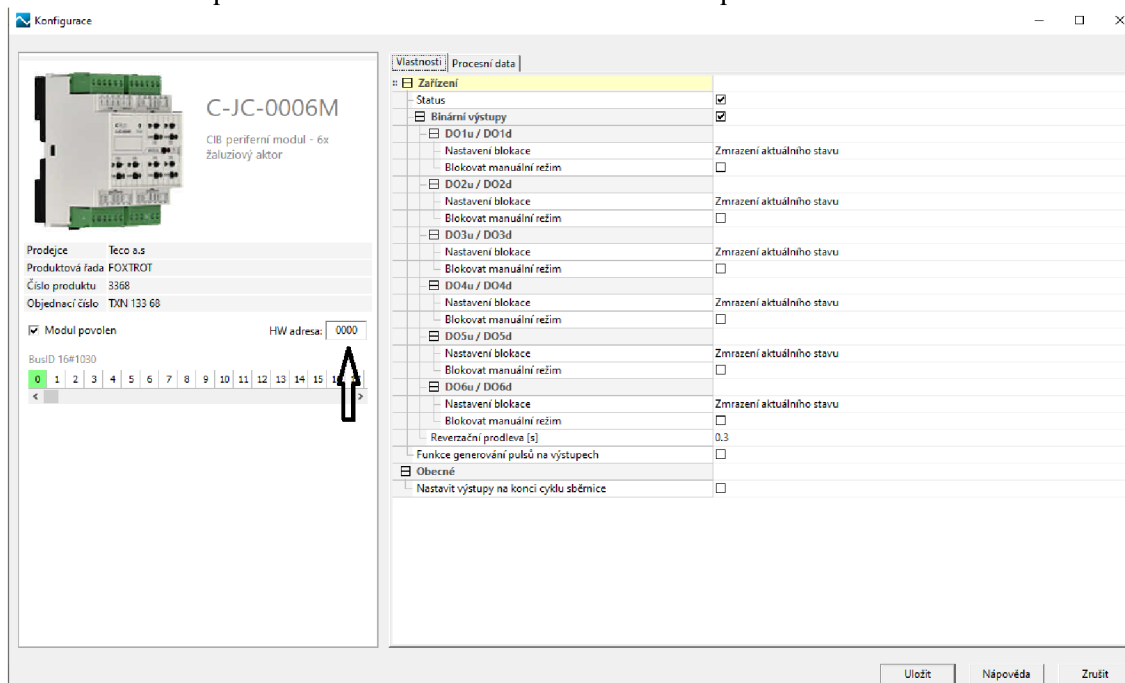
Obr. 14: Připojení periferních modulů

Volba „Přidat...“ otevře katalog možných periferních modulů. V tomto katalogu se zvolí periferní modul C-JC-0006M.



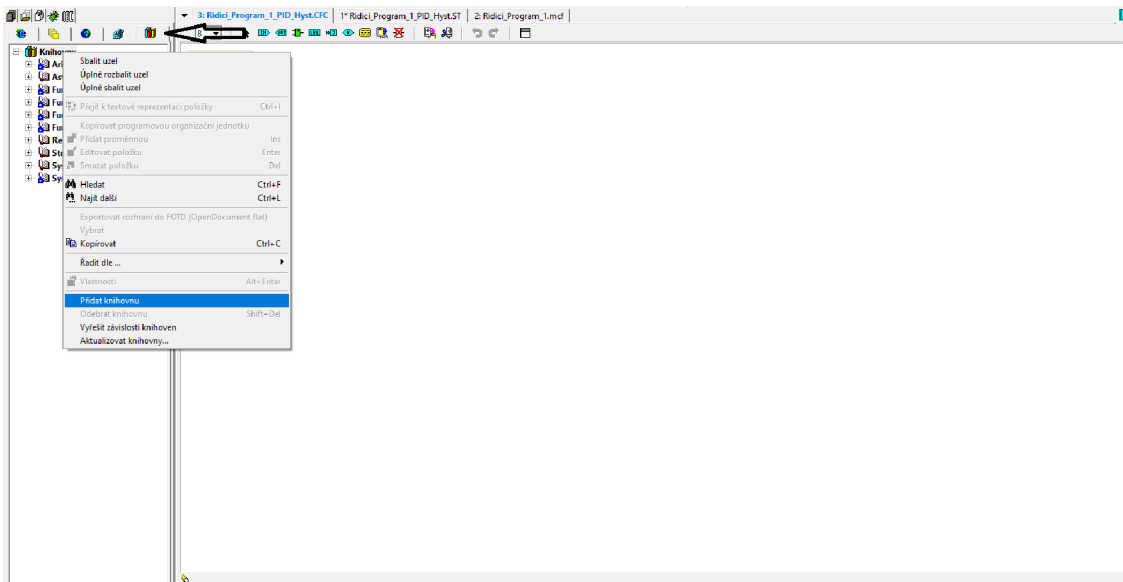
Obr. 15: Volba periferních modulů

Po přidání modulu je nezbytné periferní modul propojit s PLC centrálou. Toto propojení je zprostředkováno zadáním hardwarové adresy. Hardwarová adresa se nachází na přední straně periferního modulu.



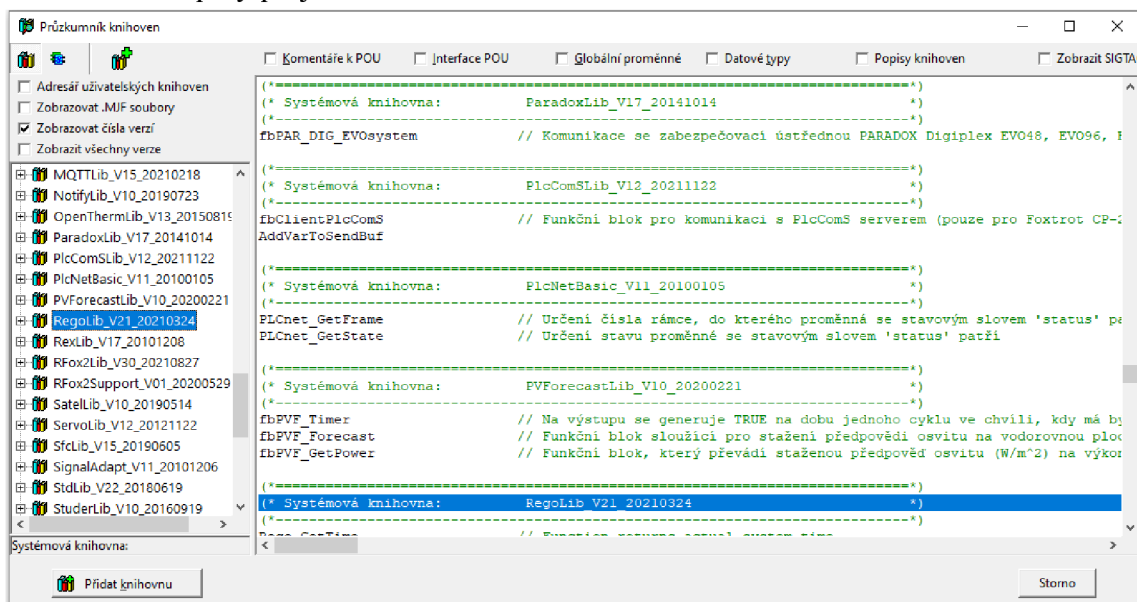
Obr. 16: Specifikace periferního modulu

Nyní je třeba nahrát požadovanou knihovnu funkčních bloků. Vybraná knihovna funkčních bloků se nazývá RegoLib. Tato knihovna mimo jiné obsahuje jak hysterezní, tak PID funkční bloky. Volba knihovny se provádí v levé části. Pro vyvolání katalogu knihoven slouží ikona se symbolem „knih“. Po kliknutí na symbol „knih“ je třeba rozbalit pravým tlačítkem myši položku „Knihovny“ a potom zvolit možnost „Přidat knihovnu“.



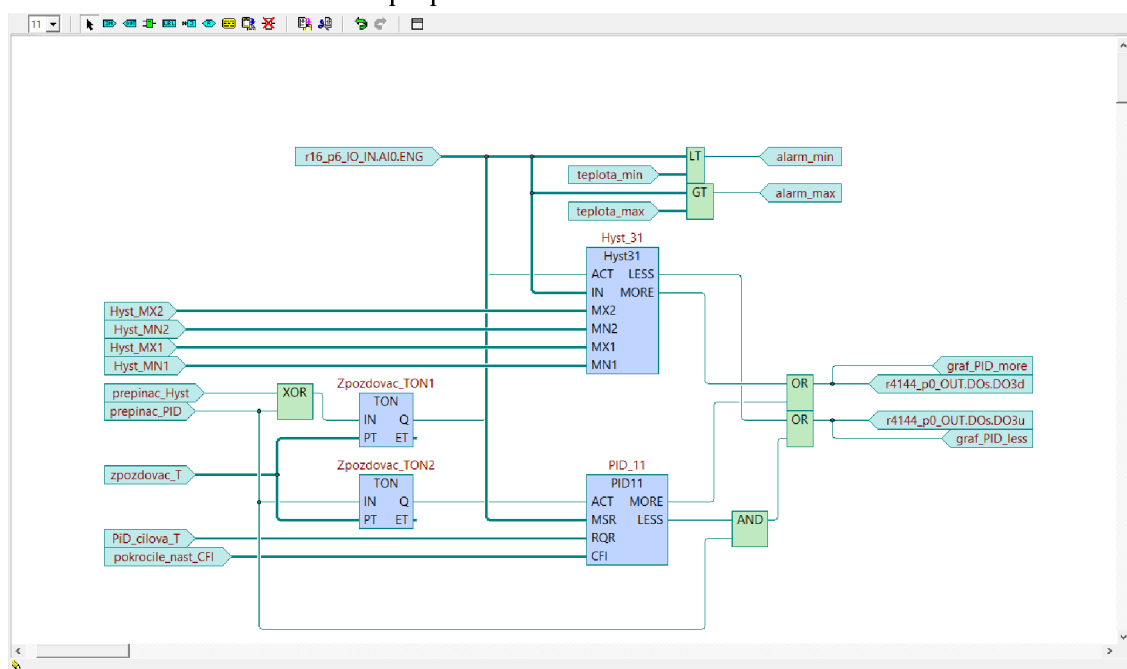
Obr. 17: Připojení knihovny funkčních bloků

Nyní stačí zvolit knihovnu RegoLib a tlačítkem „Přidat knihovnu“ ji implementovat do skupiny projektů.



Obr. 18: Volba knihovní funkce

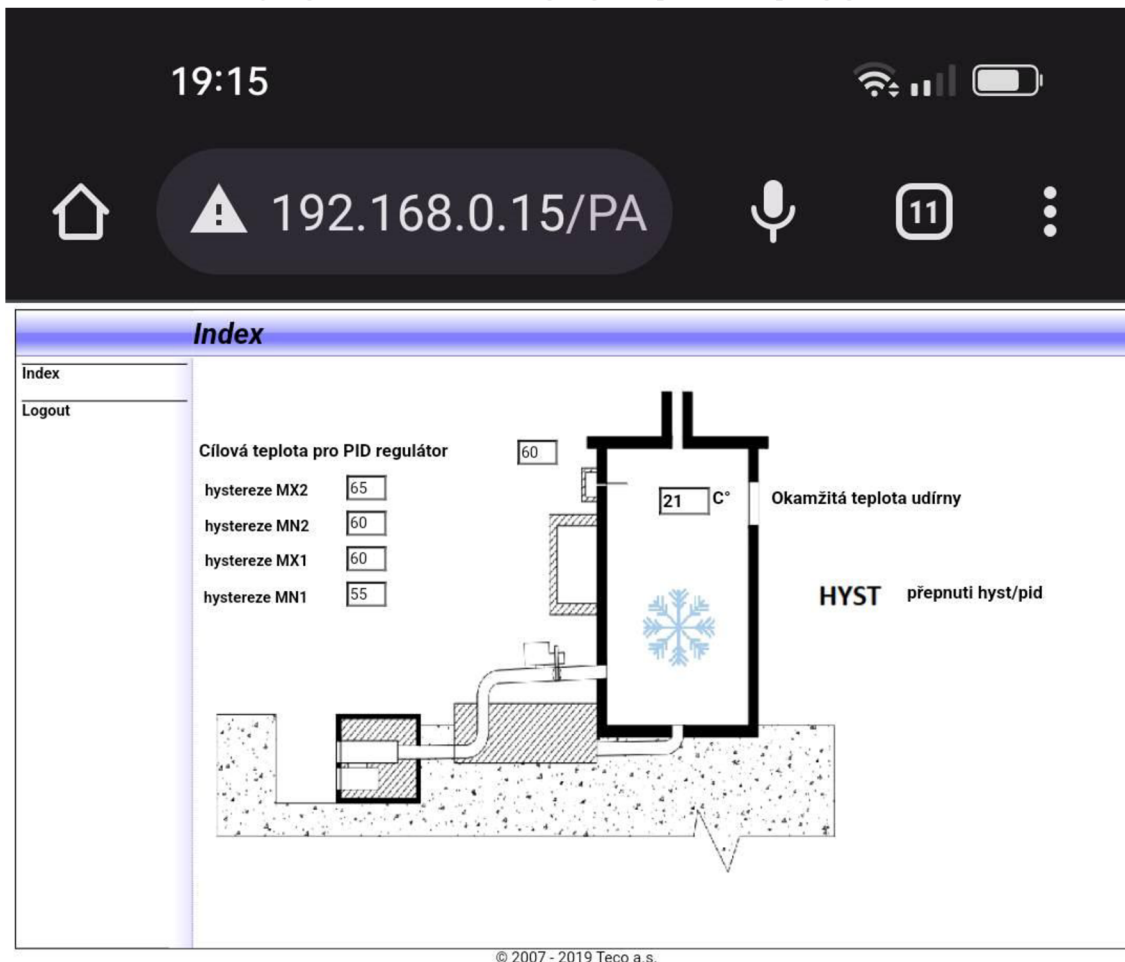
Po připojení periferního modulu a přidání knihovny je třeba vytvořit samotný program. Při tvorbě programu je nezbytné správné nastavení datových typů proměnných, správné propojení mezi vstupy, funkčními bloky a výstupy a správné přiřazení vstupních a výstupních proměnných ke kanálům řídicí jednotky a periferního modulu. Proměnná `r16_6_IO.AI0.ENG` je vstupní proměnná teploty. V programu je využito dvou funkčních bloků, které slouží k beznárazovému přepnutí.



Obr. 19: Konečný řídicí program

Webová aplikace

V řídicím programu je obsažena i webová aplikace, která uživateli umožní pohodlnější zobrazení teploty, výběr regulačního programu, nastavení vybraného regulačního programu a vizuální varování při příliš nízké či vysoké teplotě. Tato webová aplikace je funkční pouze v lokální síti a uživatel ji zobrazí zadáním lokální IP adresy řídicí jednotky do webového prohlížeče. Aplikace je zabezpečena proti modifikaci neoprávněných uživatelů uživatelským jménem a heslem, jež jsou potřebné pro její zobrazení.



Obr. 20: Lokální webová aplikace

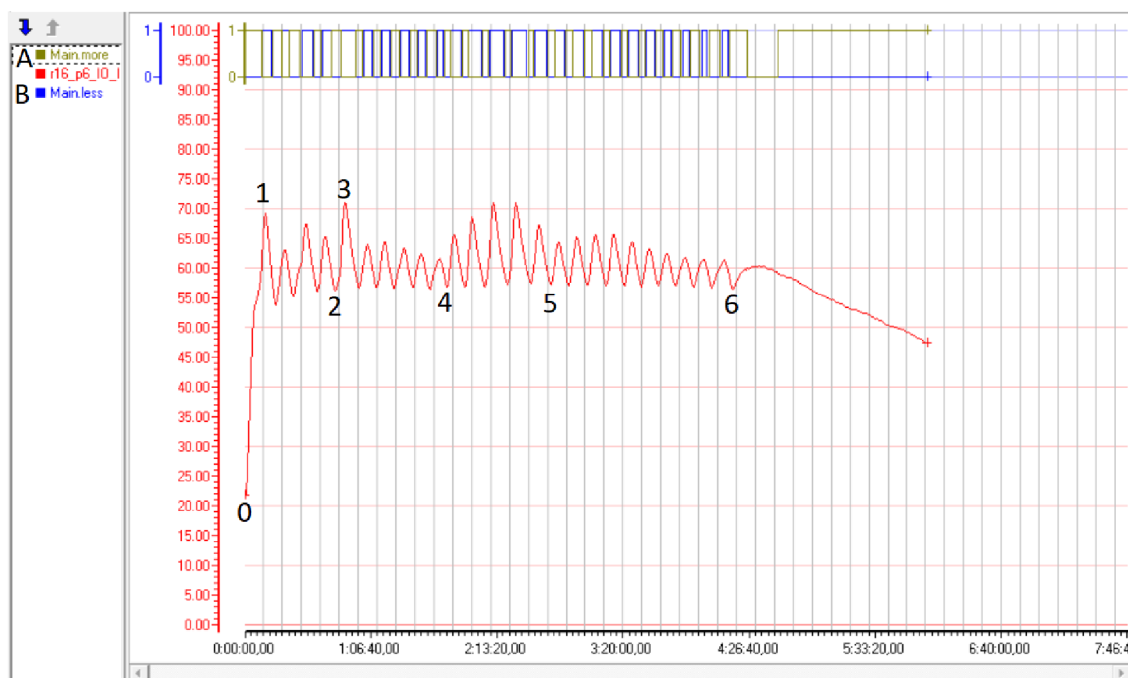
Regulační programy

Teplota v udírně je regulována servomotorem, který otáčí ovládací kouřovodovou klapku. Servomotor je ovládán řídicí centrálou. Toto ovládání je plynulé a je zprostředkováno vysláním signálu do servomotoru. Signál z řídicí centrály je vyslán do dvou možných směrů, které určují směr otáčení ovládací kouřovodové klapky. Při otáčení po směru hodinových ručiček se ovládací klapka zavírá a při směru otáčení proti hodinovým ručičkám se ovládací klapka otvírá. Délka vyslaného signálu závisí na zvoleném programu uzení.

Udírna má dva programy automatické regulace teploty:

Dvoupolohový hysterezní regulační program

Pro dvoupolohovou regulaci byl zvolen funkční blok Hyst31 knihovny RegoLib. Tento blok na rozdíl od funkčního hysterezního bloku Hyst3 v sobě obsahuje aktivační proměnnou. Dvoupolohová regulace pomocí hysterezního funkčního bloku Hyst31 byla zvolena pro intuitivní nastavení a jednoduché použití pro regulování teploty v soustavě. Pro dvoupolohovou regulaci byla možnost použít relační funkční bloky ($>$, $<$, $=$), ale tato konfigurace vyžaduje složitou implementaci skrze relační funkční bloky, aby bylo umožněno přepínání mezi spojeným (funkční blok PID11) a dvoupolohovým řízením (funkční blok Hyst31).



Obr. 21: Krátká zkouška dvoupolohového řízení pomocí funkčního bloku Hyst31

Popis grafu

- A – Proměnná A je svázána s indikátorem otevírání regulační klapky. Pokud je proměnná A v hodnotě 1, značí otevírání regulační klapky.
- B – Proměnná B je svázána s indikátorem zavírání regulační klapky. Pokud je proměnná B v hodnotě 1, značí zavírání regulační klapky.
- 0–1 – Nárůst z klidové teploty z bodu 0 (22 °C) po prvotním přiložení paliva. Z počáteční teploty v bodu 0 se teplota vyšplhala do bodu 1 (69 °C).
- 1–2 – Úsek, ve kterém fungoval dvoupolohový hysterezní regulátor v normálních podmínkách.
- 2–3 – Úsek přiložení paliva. Příkládání se událo v bodě 2 (57 °C). Teplota stoupla do bodu 3 (71 °C).
- 3–4 – Úsek, ve kterém dvoupolohový hysterezní regulátor fungoval v normálních podmínkách.
- 4–5 – Tento úsek začíná přiložením paliva do pece na dřevo a následným zkontrolováním udíci komory. Otevření udíci komory uměle ochladí teploměr, regulační program zachytí ochlazení a reaguje otevřením regulační klapky, které po zavření udíci komory způsobí nárůst a následné výkyvy teploty do bodu 5, v němž bylo přidáno menší množství paliva.
- 5–6 – Úsek, ve kterém fungoval dvoupolohový hysterezní regulátor v normálních podmínkách. Bodem 6 (56 °C) končí test dvoupolohové hysterezní regulace.

Tento test byl vykonáván v soustavě mírně přehřáté z minulých testů, proto není přítomný úsek nestálého hoření, ve kterém se tvoří dřevěné uhlíky.

Tab. 1: Proměnné funkčního bloku Hyst31

| Název proměnné | Význam proměnné | Typ proměnné | Formát proměnné |
|----------------|---------------------|--------------|-----------------|
| ACT | Aktivační proměnná | vstupní | Bool |
| IN | Měřená hodnota | | Real |
| MX2 | Maximum 2 | | Real |
| MN2 | Minimum 2 | | Real |
| MX1 | Maximum 1 | | Real |
| MN1 | Minimum 1 | | Real |
| LESS | Záporný akční zásah | výstupní | Bool |
| MORE | Kladný akční zásah | | Bool |

Bližší vysvětlení proměnných funkčního bloku Hyst31

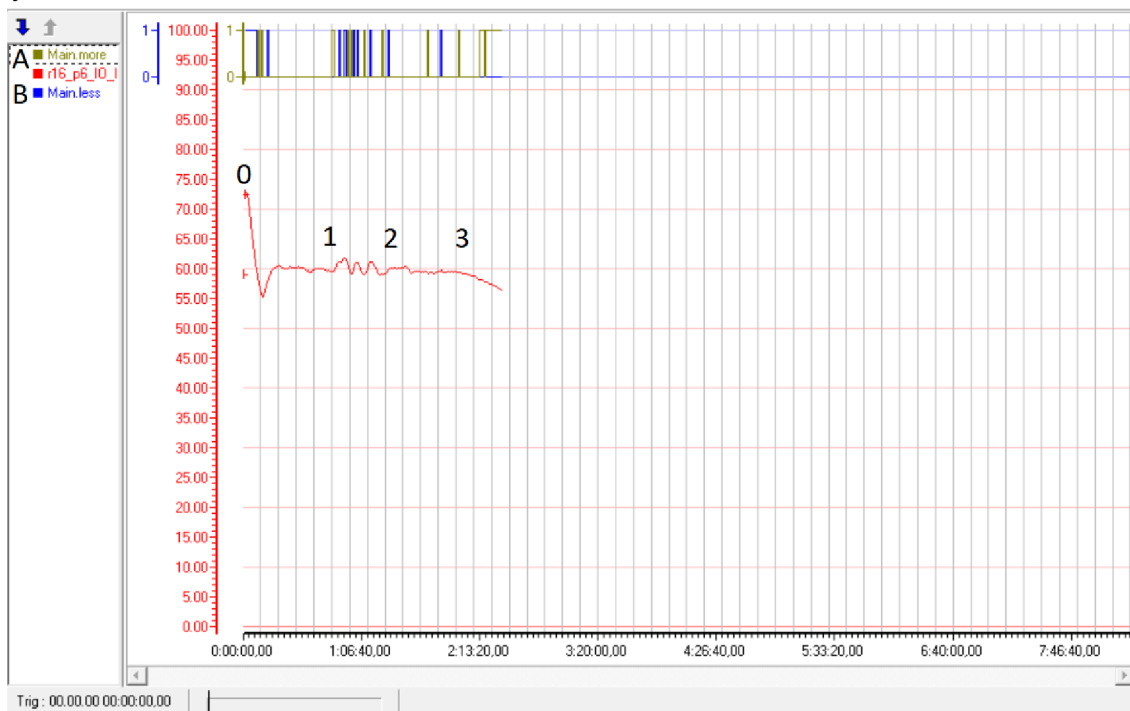
- **ACT** – Tato proměnná je aktivační proměnná, která slouží k aktivaci funkčního bloku, a tím i k přepínání mezi programy uzení. Pro aktivaci funkčního bloku je nastavena na hodnotu 1.
- **IN** – Tato proměnná je vstupní měřená hodnota, která je snímána teplotním stonkovým čidlem.
- **MX2** – Tato proměnná značí maximální teplotu, jež se stále nachází v teplotním rozsahu optimálního uzení. Při překročení této hodnoty se aktivuje výstup LESS. Hodnotu MX2 může uživatel nastavit pomocí webové aplikace.
- **MN2** – Tato proměnná značí hysterezní teplotu, při které se deaktivuje výstup LESS. Při podkročení proměnné MN2 se výstup LESS vypne (pokud je aktivní), ale je nutné, aby před podkročením proměnné MN2 teplota překročila proměnnou MX2. Hodnotu MN2 může uživatel nastavit pomocí webové aplikace.
- **MX1** – Tato proměnná značí hysterezní teplotu, při níž se deaktivuje výstup MORE. Při překročení teploty MX1 se výstup MORE vypne (pokud je aktivní), ale je nutné, aby před předkročením proměnné MX1 teplota podkročila proměnnou MN1. Hodnotu MX1 může uživatel nastavit pomocí webové aplikace.
- **MN1** – Tato proměnná značí minimální teplotu, která se stále nachází v teplotním rozsahu optimálního uzení. Při podkročení této hodnoty se aktivuje výstup MORE. Hodnotu MX2 může uživatel nastavit pomocí webové aplikace.
- **MORE** – Proměnná MORE značí kladný akční zásah. Tato hodnota byla navázána na otevírání ovládací klapky.
- **LESS** – Proměnná LESS značí kladný akční zásah. Tato hodnota byla navázána na zavírání ovládací klapky.

Pravidla pro zadávání hodnot MX2, MN2, MN1, MX1

Hodnoty MX2 a MN1 tvoří maximální a minimální rozsah optimální udící teploty. Zbývající hodnoty MX1 a MN2 se musejí nacházet v tomto intervalu. Hodnoty MX1 a MN2 mohou být stejné, protože k sobě nejsou vázané a nemohou být obě aktivované najednou. Pro ideální chod je nejvhodnější nastavení $MX2 > MN2 \geq MX1 > MN1$.

Spojité regulace řízená funkčním blokem PID11

Pro spojitě řízení byl zvolen funkční blok PID11 obsahující PID regulátor, protože obecně platí, že pro spojitou regulaci dané veličiny (teploty) přináší PID regulátor nejlepší výsledky.



Obr. 22: Krátká zkouška spojitého řízení pomocí funkčního bloku PID11

Popis grafu

- A – Proměnná A je svázána s indikátorem otevírání regulační klapky. Pokud je proměnná A v hodnotě 1 značí tak otevírání regulační klapky.
- B – Proměnná B je svázána s indikátorem zavírání regulační klapky. Pokud je proměnná B v hodnotě 1 značí tak zavírání regulační klapky.
- 0–1 – Chod regulačního programu v soustavě s normálními podmínky.
- 1–2 – Úsek, ve kterém byly ponechány dveře vzduchové komory pece mírně pootevřené. Toto pootevření způsobilo nadměrný přístup vzduchu, a tím zhoršené podmínky, které se projeví výkyvy v teplotě.
- 2–3 – Úsek, ve kterém fungoval regulační program v normálních podmínkách. Po bodu tři byla soustava ponechána vychladnout.

Pro spojitý regulační program byl využit funkční blok PID11 knihovny RegoLib. Tento funkční blok má aktivační proměnnou, která je nutná pro možnost přepínání programů uzení. Funkční blok PID11 je vhodnější pro tuto aplikaci, protože je intuitivněji nastavitelný oproti funkčnímu bloku PID1.

Funkční blok PID11 obsahuje tyto proměnné:

Tab. 2: Proměnné funkčního bloku PID11

| Název proměnné | | Význam proměnné | Typ proměnné | Formát proměnné |
|----------------|----------|---|--------------|-----------------|
| ACT | | Aktivační proměnná | vstupní | Bool |
| MSR | | Měřená hodnota | | Real |
| RQR | | Žádaná hodnota | | Real |
| MORE | | Kladný akční zásah | výstupní | Bool |
| LESS | | Záporný akční zásah | | Bool |
| CFI | | Pokročilá řídicí struktura | vstupní | |
| | MinY | Hodnota unifikovaného rozsahu pro 0 % | | Int |
| | MaxY | Hodnota unifikovaného rozsahu pro 100 % | | Int |
| | MinU | Minimální povolený akční zásah | | UInt |
| | MaxU | Maximální povolený akční zásah | | UInt |
| | dMaxU | Maximální přírůstek akční veličiny za periodu | | UInt |
| | OutCycle | Perioda vzorkování regulačního algoritmu [10ms] | | UInt |
| | PBnd | Pásmo proporcionality | | UInt |
| | Ti | Integrační časová konstanta | | UInt |
| | Td | Derivační časová konstanta | | UInt |
| | Egap | Symetrické pásmo necitlivosti | | UInt |

Bližší vysvětlení proměnných funkčního bloku PID11

- **ACT** – Tato proměnná je aktivační proměnná, která slouží k aktivaci funkčního bloku, a tím i k přepínání mezi programy uzení.
Pro aktivaci funkčního bloku je nastavena na hodnotu 1.
- **MSR** – Tato proměnná je vstupní měřená hodnota, která je snímána teplotním stonkovým čidlem.
- **RQR** – Tato proměnná značí cílovou teplotu, ke které se PID regulátor bude snažit přiblížit. Je ve stejných jednotkách jako proměnná MSR (°C).
Proměnnou RQR může uživatel měnit ve webové aplikaci.
- **MORE** – Proměnná MORE značí kladný akční zásah. Tato hodnota byla navázána na otevírání ovládací klapky.
- **LESS** – Proměnná LESS značí kladný akční zásah. Tato hodnota byla navázána na zavírání ovládací klapky.
- **CFI** – V této řídicí struktuře se nachází podrobnější nastavení funkčního bloku PID11.
 - MinY – Tato proměnná blíže specifikuje podmínky v regulované soustavě. Proměnná MinY určuje, jaký je nejmenší možný přírůstek teploty za jednu vzorkovací periodu. Pro zjednodušení je MinY nastavena na změnu 0 °C.
 - MaxY – Proměnná MaxY je stejná jako MinY. Tato proměnná určuje maximální možný přírůstek teploty za jednu vzorkovací periodu v regulované soustavě. Pro zjednodušení je MaxY nastavena na experimentálně vyzkoušenou změnu 2 °C. Tato hodnota byla vynásobena 10 pro desetinnou přesnost.
 - MinU – Tato proměnná omezuje minimální velikost povoleného akčního zásahu. Nabývá hodnot 0 % až 100 % vynásobených 10. MinU omezuje nejmenší velikost signálu na servomotor. Je důležité, aby při volbě této hodnoty byl brán ohled na rychlost pohybu servomotoru. V situaci s velmi rychlým servomotorem slouží k omezení minimálního akčního zásahu (Při hypotetickém nastavení MinY 500 odpovídající 50 % a minimálním akčním zásahem trvajícím 10 vteřin tato hodnota sníží minimální akční zásah na 5 vteřin). Minimální velikost povoleného akčního zásahu nebyla omezena.
 - MaxU – Hodnota je stejná jako MinU s rozdílem toho, že omezuje maximální akční zásah. Maximální velikost akčního zásahu nebyla omezena.
 - dMaxU – Proměnná dMaxU nastavuje maximální změnu hodnoty akční veličiny za jednu vzorkovací periodu. Zvolený servomotor mění polohu z 0° až do 90° za 150 vteřin. Ve vzorkovací periodě 25 vteřin se servomotor zvládne pohnout o 15° což je 16,666 %. Procentuální hodnota se dále násobila 100 pro desetinnou přesnost. Konečná hodnota dMaxU

činní 1 666. Tato hodnota dále upřesňuje řídicímu programu chování servomotoru.

- OutCycle – Tato hodnota určuje vzorkovací periodu regulačního algoritmu. Při příliš malé vzorkovací periodě se regulačnímu programu budou změny teploty zdát minimální a program bude vysílat minimální pulzy na servomotor. Při příliš velké vzorkovací periodě bude regulace méně přesná. Z experimentálních testů byla vzorkovací perioda nastavena na 25 000 ms.
- PBnd – PBnd značí pásmo proporcionality. Proměnná PBnd je převrácená hodnota zesílení a udává nepřímo zesílení regulátoru. Z experimentálních testů bylo pásmo proporcionality nastaveno na 200 ms.
- Ti – Integrační časová konstanta má vliv na celkový zásah regulátoru. Čím déle trvá regulační odchylka, tím je větší vliv integrační časové konstanty. Zvětšení integrační konstanty zmenšuje zesílení. Z experimentálních testů byla konstanta Ti nastavena na 1 500 ms.
- Td – Derivační časová konstanta nejvíce působí v okamžiku změny požadované hodnoty, kdy se skokově změní regulační odchylka. Vliv derivační časové konstanty postupně slábne a je nahrazován vlivem integrační časové konstanty. Z experimentálních testů byla konstanta Td nastavena na 0 ms.
- Egap – Symetrické pásmo necitlivosti je pásmo, ve kterém se regulátor vypíná. Symetrické pásmo necitlivosti je aktivní, pouze když se regulovaná veličina dostatečně přiblíží žádané hodnotě. Určuje procentuálně pásmo, ve kterém se výchylka do výstupu nezahrnuje, a tím se předchází spínání při malých výchyilkách okolo žádané hodnoty.¹³

¹³ *Nástroj PID Maker. [online]. 2008 [cit. 2023-03-20]. Dostupné z: <https://catalog.tecomat.cz/produkt/nastroj-pidmaker?fbclid=IwAR30acDi9rsutLo2wx9X-DuYfsExTmaCvtKw4T1sggbRht-m811j2HXWWK8#download>.*

3.3.2 Teplotní čidlo

Teplotní čidlo značky Regmet typu Pt1000 je stonkový snímač teploty s rychlou odezvou. Tato teplotní čidla jsou primárně používána v prostředích s proudícími kapalinami nebo proudícími plyny. Dále při výběru byl brán ohled na rychlost snímání pro přesnější plynulou regulaci pomocí funkčního bloku PID11. Teplotní čidlo měří v rozsahu od $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ až do $150\text{ }^{\circ}\text{C}$. Toto je adekvátní rozsah pro bezpečné měření teploty v udrně. Čidlo vysílá do řídicí jednotky Foxtrot CP-2005 analogový signál, který slouží jako vstupní proměnná pro regulační program.



Obr. 23: Teplotní čidlo Regmet Pt1000¹⁴

¹⁴ [thumb_cc9663e9ac964b64ae2f844e72c19b19_540x400_auto]. In: Bola.cz [online]. 4. května 2023 [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: https://www.bola.cz/snimac-do-vzt-potrubi-regmet-p131-150-100?gclid=Cj0KCQjwr82iBhCuARIsAO0EAZxeN7Umbw5LqSadLexdT4kOHFMmwgxdN9fmK9WUX2ozld-OhwuORBgaAqtkEALw_wcB

3.3.3 Kouřovod

Kouřovod je silnostěnná ocelová roura o tloušťce plechu 1,5 mm. Roura kouřovodu propojuje pec na dřevo s udicí komorou. V této cestě se nachází i ovládací klapka a dva tvarové prvky (kouřovodová kolena). Kouřovod vyvádí kouř ze zahloubené pece dvěma koleny nad zem. V nadzemní části kouřovodu se nachází ovládací klapka a konečně udicí komora. Domácí udírna před modifikací měla podzemní keramický kouřovod. Ten ve srovnání s nadzemním kovovým kouřovodem měl nižší teplotní ztráty, ale tyto ztráty na vysoké teplotě (při nekontrolovaném hoření je teplota kouře až 100 °C) jsou žádoucí. Na části kouřovodu s ovládací klapkou je namontován servomotor.



Obr. 24: Kouřovodový tvarový prvek¹⁵

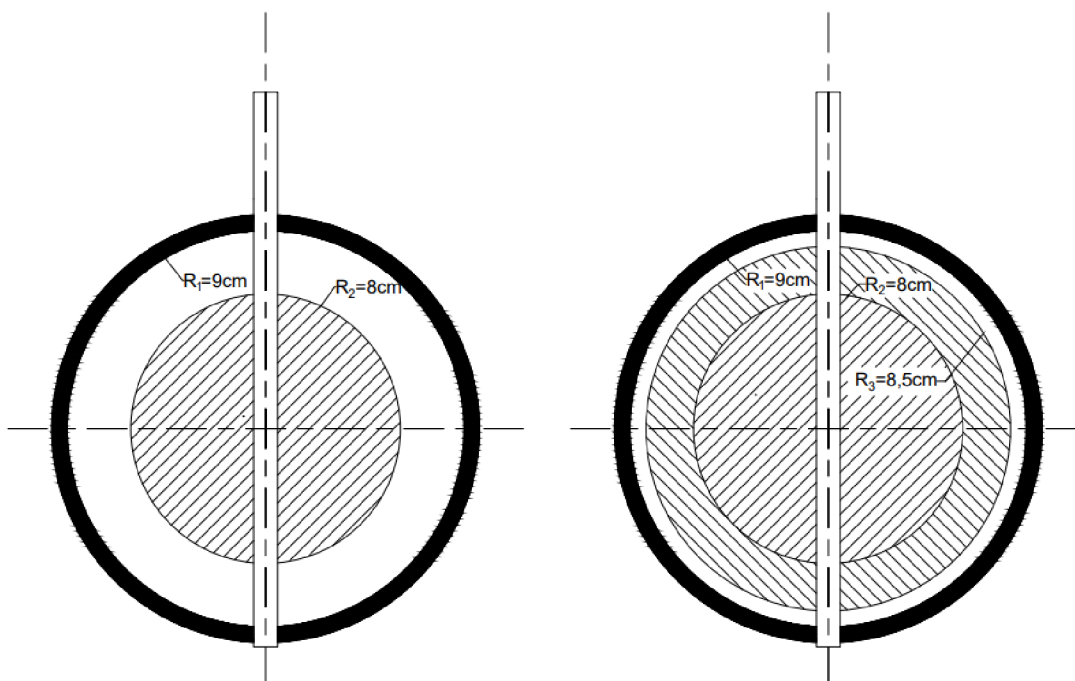
3.3.4 Kouřovodová klapka

Kouřovodová klapka je modifikovaná kouřovodová silnostěnná plechová trubka s klapkou. Původně byla klapka značně menší než průměr kouřovodu, což by způsobovalo obtížnější regulaci teploty. Na strany klapky byly připevněny kovové přídatky, které při plném uzavření klapky limitují průchod kouře. Kovové přídatky jsou navrženy tak, aby kouř stále v malém množství proudil do udicí komory. Další modifikace byla zhotovena na hřídeli klapky. Tato modifikace sestává z odstranění madla a vyvrtání otvoru skrz hřídel, který slouží k upevnění a vystředění servomotoru. Na samotné trubce je i upevňovací součást pro servomotor.

¹⁵ [33744_218__vyr_98Koleno-90-800x800]. In: kupkamna.cz [online]. 4. května 2023 [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://www.kupkamna.cz/sil-kourovovody/kourovody-prumer-130mm/kourovod-koleno-130-mm>



Obr. 25: Kouřovodová klapka před implementací kovových přídavků¹⁶



Obr. 26: Kouřovodová klapka před a po implementaci kovových přídavků

¹⁶ [160106-2.jpg]. In: zelezarstvi-fiala.cz [online]. 11. května 2023 [cit. 2023-05-11]. Dostupné z: https://zelezarstvi-fiala.cz/eshop.php?p=eshop_productinfo&id=160106

Prostupnost kouřovodové klapky

Při plném otevření je průchodný obsah 100 % (plocha hřídele lze zanedbat). Plocha při otevření je:

$$S_1 = \pi \cdot R_1^2 = \pi \cdot 9^2 = 254,5 \text{ cm}^2$$

Plocha modifikované klapky je:

$$S_2 = \pi \cdot R_3^2 = \pi \cdot 8,5^2 = 227 \text{ cm}^2$$

Neprostupná plocha při úplném zavření klapky v procentech je:

$$S_{\text{neprostup}\%} = \frac{S_2}{S_1} \cdot 100 = 89,2 \%$$

Z tohoto plyne, že prostupná plocha při úplném zavření tvoří

$$S_{\text{prostup}\%} = 100 - S_{\text{neprostup}\%} = 10,8 \%$$

3.3.5 Servomotor

Servomotor je značky Belimo typ LM 230 A. Tento servopohon je ideální pro plynulé řízení. Servopohon obsahuje bezpečnostní opatření proti přetížení. Další podstatnou výhodou je automatické vypnutí servopohonu při dosažení nastavitelného dorazu. Při namontování ke kouřovodové klapce je úhlový rozsah nastaven od 0 °C do 90 °C. Servopohon je připevněn skrz upevňovací součást ke kouřovodové klapce. Upevňovací součást byla upravena tak, aby byl zajištěn co nejmenší přenos tepla mezi kouřovodem a servopohonem. Přenos tepla přímým kontaktem se děje skrz upevňovací součást a šroub, který je skrz otvor v hřídeli ovládací klapky. Nepřímý přenos tepla se děje po celé spodní části servopohonu. Servopohon byl připevněn takovým způsobem, aby konfigurace umožňovala největší možnou vzduchovou mezeru mezi horkým kouřovodem a samotným pohonem. Tato mezera činí 0,9 cm.

Parametry servomotoru

Tab. 3: Vlastnosti servomotoru Belimo LM 230 A

| | |
|------------------------|--------------------|
| Krouticí moment | 5 Nm |
| Napájení | 230 V |
| Doba přestavení | 150 s |
| Bezpečná teplota okolí | -30 °C až 50 °C |
| Režim ovládání | 2-bodové, 3-bodové |

Obr. 27: Servomotor Belimo LM 230 A¹⁷

3.3.6 Udící komora

Udící komora je místo, ve kterém se konzervuje masný výrobek kouřem. Rozměry udící komory jsou 55 cm x 60 cm x 160 cm. Do této komory ústí kouřovod a nachází se v ní stonkové teplotní čidlo. Udící komora je opatřena vkládacími dveřmi a třemi závěsnými nosníky.

3.3.7 Pec na dřevo

Pec obsahuje dvě komory. Horní komora je příkladací komora, ve které se nachází hořící dřevo a žhavé dřevěné uhlíky. Spodní vzduchová komora slouží k ruční regulaci přívodu vzduchu do horní komory (při automatické regulaci teploty byla spodní komora přitěvněna a ponechána v této poloze). Pec je zahlubena do hloubky 60 cm.

¹⁷ [1280x1280_132202-ff9900]. In: czvzduchotechnika.cz [online]. 4. května 2023 [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: https://www.czvzduchotechnika.cz/belimo-lm230a/?gclid=Cj0KCQjwr82iBhCuARIsAO0EAZyp6pegrjwVuVB2iH39ExxDW0NuBGhBRvbnpJPlxlEOgQRfyFE-waAs3EEALw_wcB

3.3.8 Analyzátor spalin

Během chodu udírny by bylo vhodné využít analyzátor spalin pro upřesnění kouře, který se nachází v přímém kontaktu s uzeným produktem. Analyzátor spalin je schopen měřit spaliny pouze omezenou dobu (2 min), než se senzor kontaminuje spalinami. Tato kontaminace umožňuje měřit spaliny pouze ručně, a to skrz speciálně připravený otvor v udící komoře. Po měření je třeba měřicí sondu očistit. Ideálním analyzátozem pro udírnu by byl testo 320-2 LL vzhledem k velkému rozsahu parametrů, který je tento analyzátor schopen měřit. Primární parametry, které by tato práce využila je tah pece na dřevo a měření spalin (teplota, CO₂, CO). Analyzátor spalin testo 320-2 LL v tomto projektu nebyl implementován vzhledem k velmi vysoké ceně.



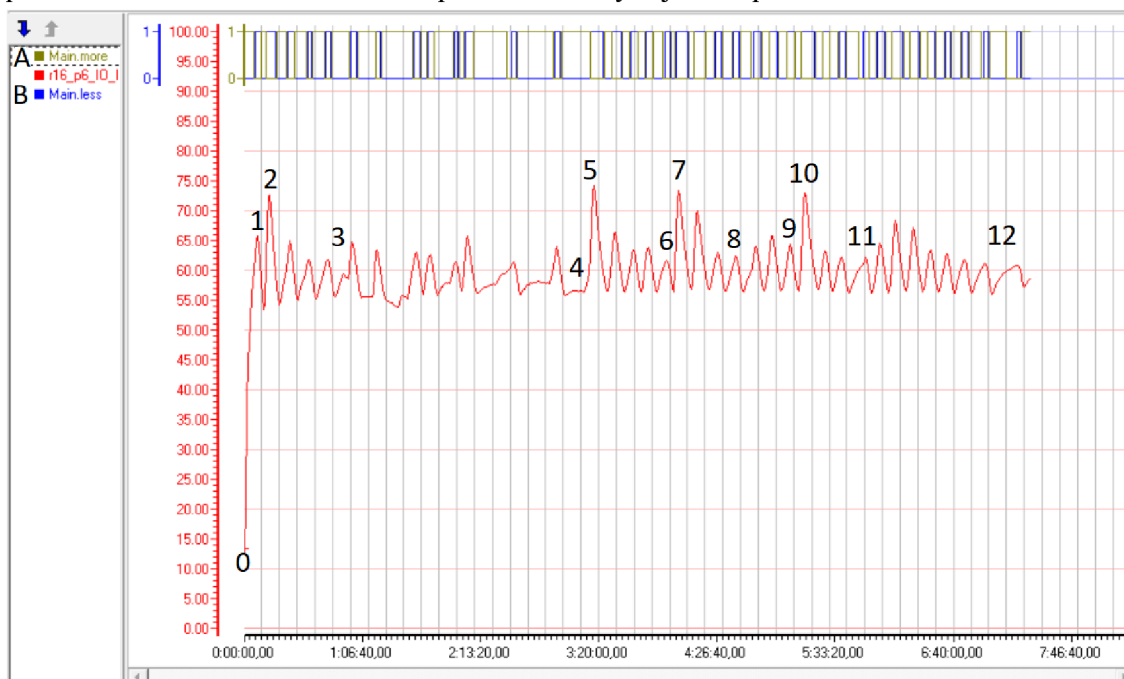
Obr. 28: Analyzátor spalin testo 320-2 LL¹⁸

¹⁸ [testo-330-2LL_p_in_emi_000783_pr1]. In: testo.com [online]. 4. května 2023 [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://www.testo.com/cz-CZ/testo-330-2-ll/p/0632-3307>

4 TESTY A ZHODNOCENÍ REGULAČNÍCH PROGRAMŮ

4.1 Test regulace teploty programem s dvoupolohovým řízením

Praktický test dvoupolohové regulace probíhal po dobu 7 hodin. Zachycení grafu bylo provedeno vestavěnou funkcí GraphMaker ve vývojovém prostředí Mosaic.



Obr. 29: Graf regulace teploty dvoupolohovým řízením v závislosti na čase

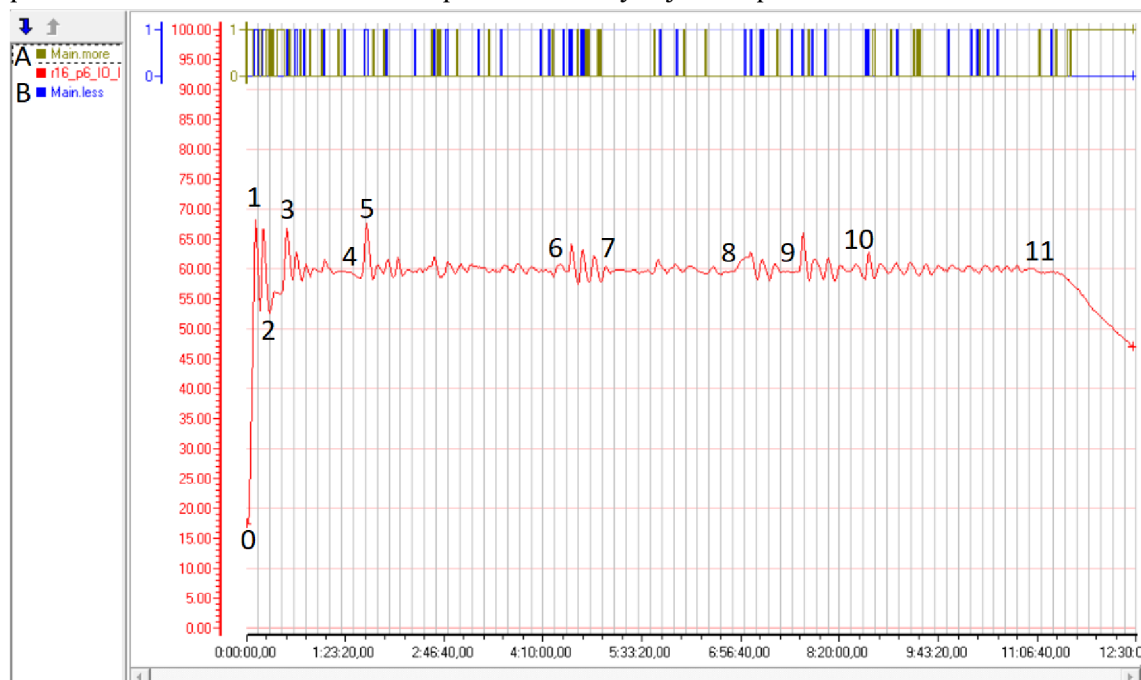
Popis grafu:

- A – Proměnná A je svázána s indikátorem otevírání regulační klapky. Pokud je proměnná A v hodnotě 1, značí otevírání regulační klapky.
- B – Proměnná B je svázána s indikátorem zavírání regulační klapky. Pokud je proměnná B v hodnotě 1, značí zavírání regulační klapky.
- 0–1 – Úsek značí nárůst teploty po prvotním přiložení. Při tomto prvotním přiložení lze sledovat prudký nárůst teploty z klidové teploty (0) až na teplotu 65 °C (1). Hysterezní program začíná zavírat regulační klapku při teplotě 60 °C a teplota přestává růst na 65 °C. V prvotním cyklu vzroste teplota až na 73 °C (2), protože nyní je palivo plně rozhořené bez přítomnosti žhavých uhlíků.
- 2–3 – Úsek, ve kterém rozhořené palivo umožňuje chvilkový normální stav hysterezní regulace.

- 3–4 – V tomto úseku se tvoří žhavé uhlíky, jež jsou ideálním palivem pro uzení. Tvoření žhavých uhlíků je typické svou nestálostí, špatným hořením a potřebou častého přikládání do pece na dřevo.
- 4–12 – Úsek, ve kterém je v peci dostatečné množství žhavých uhlíků. Úsek začíná teplotním nárůstem po přiložení (4) až do teploty 75 °C (5). Po tomto teplotním vrcholu nastává ustálené uzení pomocí hysterezního regulačního programu. Z důvodu klesající teploty bylo v bodě 6 přiloženo palivo do pece na dřevo. Přidání paliva zapříčinilo rychlý nárůst teploty až na maximální teplotu 75 °C (7). Po tomto vrcholu se soustava vrátila do normálních pracovních podmínek až do bodu 8, ve kterém bylo přiloženo malé množství paliva. Další přiložení proběhlo v bodě 9. Přiložené množství bylo příliš velké, a proto rychle vzrostla teplota znovu na hodnotu 75 °C (10). Další přiložení proběhlo v bodě 11, což bylo konečné přiložení. Po přiložení v bodě 11 byla soustava ponechána pozvolnému dohoření. Hysterezní regulační program byl schopný pracovat ve vymezených podmínkách až do bodu 12. V bodě 12 nebylo v peci na dřevo dostatek paliva a nastává dohoření.

4.2 Test regulace teploty programem se spojitým řízením

Praktický test spojitě regulace probíhal po dobu 11 hodin. Zachycení grafu bylo provedeno vestavěnou funkcí GraphMaker ve vývojovém prostředí Mosaic.



Obr. 30: Graf regulace teploty spojitým řízením v závislosti na čase

Popis grafu:

- A – Proměnná A je svázána s indikátorem otevírání regulační klapky. Pokud je proměnná A v hodnotě 1, značí otevírání regulační klapky.
- B – Proměnná B je svázána s indikátorem zavírání regulační klapky. Pokud je proměnná B v hodnotě 1, značí zavírání regulační klapky.
- 0–1 – Úsek značí nárůst teploty po prvotním přiložení. Při tomto prvotním přiložení lze sledovat prudký nárůst teploty z klidové teploty (0) až na teplotu 68 °C (1).
- 1–2 – V tomto úsek je palivem dřevo oproti žádaným žhavým uhlíkům, a proto je teplota nestálá. Regulátor z důvodu vysoké teploty zavře regulační klapku, a to způsobí částečné zadušení ohně (2).
- 2–3 – Úsek, ve kterém dojde k otevření regulační klapky, které zapříčiní rozhoření ohně do teploty 67 °C (3).
- 3–4 – Úsek normálního chodu spojitého regulačního programu. Tento úsek vyžadoval dřívější přiložení paliva, protože se v peci na dřevo nacházela kombinace žhavých uhlíků a dřeva.
- 4–5 – Úsek značí přiložení paliva a následný nárůst teploty na hodnotu 67 °C (5).
- 5–6 – Úsek normálního chodu spojitého regulačního programu. V peci jsou již žhavé uhlíky. Žhavé uhlíky mají stabilnější hoření, které je lépe regulovatelné a uchovávají výhřevnost déle bez potřeby přikládání.
- 6–7 – Úsek začíná přiložením (6) a následnou kontrolou udíčí komory. Otevření udíčí komory uměle ochladí teploměr, regulační program zachytí ochlazení a reaguje pootevřením regulační klapky, které po zavření udíčí komory způsobí nárůst a následné výkyvy teploty.
- 7–8 – V tomto úsek funguje regulační program v normálních podmínkách.
- 8–9 – Úsek podobný úseku 6–7. Po přiložení menšího množství paliva byla zkontrolována udíčí komora.
- 9–10 – Úsek podobný úsek 3–4. V bodě 9 došlo k přiložení z důvodu dohořívajícího paliva v peci na dřevo. Nedostatek dřevěných uhlíků způsobí mírné výkyvy v teplotě z důvodů nestálého hoření. V bodě 10 nastalo poslední přiložení paliva.
- 10–11 – Úsek normálního chodu regulačního programu. V tomto úseku se nacházel dostatek dřevěných uhlíků, který zajistil stabilní chod až do dohoření v bodě 11.

4.3 Zhodnocení regulačních programů

4.3.1 Ruční regulace teploty

Ruční regulace byla časově velmi náročná a dosažená přesnost byla velmi nízká. Při ruční regulaci teploty v domácí udírně se teplota pohybovala v rozmezí ± 12 °C. Přikládání paliva bylo třeba každých 40 až 55 minut.

4.3.2 Dvoupolohové řízení pomocí hysterezního funkčního bloku Hyst31

Automatická regulace teploty za pomoci hysterezního funkčního bloku Hyst31 má oproti spojitému řízení mnohem snazší implementaci. Tento regulační program dosahoval přesnosti okolo ± 5 °C. Tato přesnost je ve srovnání s ruční regulací teploty velkým zlepšením, ale byla očekávána přesnost okolo ± 2 °C až ± 3 °C. Tato nepřesnost s největší pravděpodobností plyne z nestálého hoření při tomto typu regulace.

Přikládání paliva bylo třeba každou hodinu. Podobnost v době mezi přikládáními plyne ze stejného principu regulace, který reaguje na příliš nízkou nebo vysokou teplotu otevřením případně zavřením regulační klapky. Toto otevření a zavření regulační klapky způsobuje rozhoření a přidušení ohně v peci na dřevo. Hoření tohoto typu je nestále a ve srovnání se spojitou regulací teploty palivo rychleji vyhoří.

4.3.3 Spojité řízení pomocí funkčního bloku PID11

Spojité řízení po vhodném nastavení funkčního bloku PID11 dosahovalo velice dobrých výsledků. Teplota byla regulována s velmi vysokou přesností ± 1 °C. Implementace tohoto funkčního bloku byla obtížnější, neboť funkční blok PID11 je specificky programován tak, aby při vypnutí aktivační proměnné (ACT) začal uzavírat klapku. Toto omezení bylo vyřešeno pomocí logické funkce AND.

Další obtížnou částí bylo samotné nastavení funkčního bloku PID11. Udírna jako soustava obsahuje mnoho proměnných, které ovlivňují rychlost hoření (typ dřeva, velikost dřeva, suchost dřeva a přítomnost žhavých uhlíků, popřípadě hořícího dřeva).

Před nastavením hodnot funkčního bloku PID11 byla zvážena Ziegler-Nicholsova metoda nastavení PID regulátoru. Tato metoda spočívá ve vyřazení integrační konstanty T_i (nastavena na maximální možnou hodnotu) a derivační konstanty T_d (nastavena na nulu). Následně je třeba měnit zesílení (v tomto případě je zesílení obrácená hodnota pásma proporcionality P_{bnd}), dokud se nenarazí na hranici stability. Po dosažení meze stability lze pomocí tabulky zvolit vhodné zesílení, integrační konstantu T_i a derivační konstantu T_d . Při použití metody Ziegler-Nicholse by mohlo během kritického zesílení dojít k vážnému poškození, popřípadě ke zničení servomotoru vlivem vysoké teploty. Z tohoto důvodu nebyla tato metoda použita.

Nastavení funkčního bloku PID11 soustavy bylo vykonáváno experimentálně, tj. proměnné a konstanty funkčního bloku PID11 byly měněny během praktického testu. Prvním krokem při nastavování bylo zvolení periody vzorkování (Outcycle). Na vzorkovací periodě je závislá hodnota nejmenšího možného přírůstku za vzorkovací periodu (MinY), hodnota největšího možného přírůstku za vzorkovací periodu (MaxY) a maximální přírůstek akční veličiny za vzorkovací periodu (dMaxU). Vzorkovací perioda se volila za pomoci základních hodnot funkčního bloku PID11 (mimo MinY, MaxY a dMaxU). Při změně vzorkovací periody je třeba provést přepočtení maximálního přírůstku akční veličiny za vzorkovací periodu a přepočtení maximálního a minimálního přírůstku za vzorkovací periodu. Vhodná vzorkovací perioda by neměla být příliš krátká ani příliš dlouhá (Při příliš krátké vzorkovací periodě spojitý regulátor není schopný přesně zachytit změny v teplotě. Při příliš dlouhé vzorkovací periodě je zpomalena reakce na rostoucí, popřípadě klesající, teploty. Teplota může během dlouhé vzorkovací periody vrůst nebo klesnout velmi rychle, aniž by spojitý regulátor reagoval na tyto změny včas). Po správném zvolení vzorkovací periody (teplota se blížila žádané hodnotě) byly nastaveny zbylé konstanty (P_{Bnd} , T_i , T_d). Během procesu nastavování této soustavy bylo zjištěno, že spojitá regulace funkčním blokem PID11 je lepší, pokud je derivační složka zanedbána (T_d je rovna nule), a tím pracuje funkční blok PID11 jako PI regulátor.

Konečné nastavení funkčního bloku PID11 je:

Tab. 4: Konečné nastavení funkčního bloku PID11

| Název proměnné | Jednotka | Hodnota |
|----------------|----------|---------|
| MinY | [°] | 0 |
| MaxY | [°] | 2 |
| MaxU | [%] | 100 |
| dMaxU | [%] | 16,666 |
| OutCycle | [ms] | 25 000 |
| PBnd | [%] | 90 |
| Ti | [s] | 150 |
| Td | [s] | 0 |
| Egap | [%] | 0 |

Správné odladění prodloužilo dobu, ve které není potřeba přikládat palivo. Při tomto regulačním programu bylo třeba přidávat palivo každé dvě a půl až tři hodiny, což je velmi výrazné zlepšení oproti regulaci pomocí hysterezního programu nebo ruční regulaci.

5 ZÁVĚR

Tato práce měla za cíl vytvořit prototyp udírny, který je schopný automaticky regulovat teplotu. Pro dosažení tohoto cíle bylo třeba přidat komponenty firmy Teco Foxtrot CP-2005 a C-JC-0006M, jež slouží jako řídicí centrála pro regulaci teploty. Tato řídicí centrála je uschována v rozvaděči, který ji chrání před nepříznivými vlivy okolního prostředí. Další důležitou modifikací bylo samotné zhotovení nadzemního kouřovodu. Nadzemní kouřovod je nutný pro instalaci servomotoru ke kouřovodové klapce. Tato klapka musela být též modifikována. Servomotor je konstruován pouze na jednu velikost hřídele, proto musela být hřídel kouřovodové klapky upravena, aby byla zajištěna soustřednost při otáčení. K samotné klapce byly připevněny postranní kovové přídávky. Kovové přídávky byly navrženy tak, aby jimi při plném zavření prošlo malé množství kouře, ale aby zároveň v zavřeném stavu klapka efektivně snižovala teplotu. Prototyp udírny s automatizovanou regulací teploty byl navrhnout tak, aby rozvaděčová skříň s řídicí centrálou, kouřovodová klapka, servomotor a teplotní čidlo šly lehce namontovat a vymontovat.

Řídicí program, který byl v této práci vytvořen, obsahuje dvě uživatelem volitelné formy regulace teploty (dvoupolohová a spojitá regulace). Vestavěná funkce GraphMaker umožňuje zobrazení vývoje teploty v reálném čase. Ve vestavěné funkci WebMaker byla vytvořena místní webová stránka, která umožní uživateli zobrazit důležité informace o teplotě v udírně. Tato stránka v sobě má i grafické varování, pokud teplota překročí, nebo podkročí nastavené hodnoty.

Funkčnost a přesnost řídicího programu byla prakticky otestována dvěma uzeními masných výrobků. Z grafů lze snadno vyčíst, že spojitá regulace pomocí funkčního bloku PID11 dosahuje mnohem lepších výsledků než dvoupolohová a ruční regulace teploty, jak z hlediska potřeby přidávat palivo, tak i rozmezí, ve které se teplota pohybuje. Dvoupolohová regulace pomocí funkčního bloku Hyst31 je mnohem přesnější než ruční regulace, ale přesnost nedosahuje očekávaných výsledků.

Modifikace domácí udírny, jež umožnily automatickou regulaci teploty, velmi usnadnily obtížný a časově náročný proces ručního regulování teploty. Uživatel byl dobře informován skrze webovou aplikaci o teplotní situaci v udícní komoře. Pro bližší informace o vývoji teploty si uživatel mohl zobrazit ve vestavěné funkci GraphMaker graf teploty v závislosti na čase.

Implementace analyzátoru spalin by poskytla užitečné informace o spalinách, které jsou v přímém kontaktu s potravinovým výrobkem, ale analyzátory spalin jsou finančně velmi nákladné měřicí přístroje.

Výsledkem práce je úspěšná uživatelsky přívětivá automatická regulace teploty v domácí udírně.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

Literatura

- [1] ŠVARC, Ivan, MATOUŠEK, Radek, ŠEDA, Miloš, VÍTEČKOVÁ, Miluše. *Automatické řízení*. Akademické nakladatelství CERM, VUT v Brně 2011, ISBN 978-80-214-4398-3.
- [2] HELEBRANT, František, MONI, Vlastimil, BLATA Jan. *Studijní podklady: Termografie*. Ostrava: Vysoká škola baňská – Technická univerzita Ostrava, 2010.

Internetové zdroje

- [3] *Nakládání a uzení masa*. [online]. [cit. 2023-05-02] Dostupné z: <https://www.udirny.cz/o-uzeni/nakladani-a-uzeni-masa/?fbclid=IwAR0FwBq5jDaarXWLn5FhAjf8P0DytbsKBz02cWXbgaHMyUAkLSpOeFP-39c>.
- [4] *Nástroj PID Maker*. [online]. 2008 [cit. 2023-03-20]. Dostupné z: <https://catalog.tecomat.cz/produkt/nastroj-pidmaker?fbclid=IwAR30acDi9rsutLo2wx9X-DuYfsExTmaCvtKw4T1sggbRht-m8l1j2HXWWK8#download>.

SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK

| | | |
|----------|------|--|
| ACT | bool | Aktivační proměnná |
| MSR | real | Měřená hodnota |
| RQR | real | Žádaná hodnota |
| MORE | bool | Kladný akční zásah |
| LESS | bool | Záporný akční zásah |
| CFI | - | Pokročilá řídicí struktura |
| MinY | int | Hodnota unifikovaného rozsahu pro 0 % |
| MaxY | int | Hodnota unifikovaného rozsahu pro 100 % |
| MinU | int | Minimální povolený akční zásah |
| MaxU | int | Maximální povolený akční zásah |
| dMaxU | uint | Maximální přírůstek akční veličiny za periodu |
| OutCycle | uint | Perioda vzorkování regulačního algoritmu [10 ms] |
| PBnd | uint | Pásmo proporcionality |
| Ti | uint | Integrační časová konstanta |
| Td | uint | Derivační časová konstanta |
| Egap | uint | Symetrické pásmo necitlivosti |
| IN | real | Měřená hodnota |
| MX2 | bool | Maximum 2 |
| MN2 | bool | Minimum 2 |
| MX1 | bool | Maximum 1 |
| MN1 | bool | Minimum 1 |

| | |
|--|----|
| Obr. 1: Schéma domácí udírny | 26 |
| Obr. 2: Schéma udírny s automatickou regulací teploty | 28 |
| Obr. 3: Řídicí jednotka Tecomat Foxtrot CP-2005 | 30 |
| Obr. 4: Periferní modul C-JC-0006M | 30 |
| Obr. 5: Schéma zapojení řídicí centrály | 31 |
| Obr. 6: Současné zapojení řídicí centrály | 33 |
| Obr. 7: Zavádění nové skupiny projektů ve vývojovém prostředí Mosaic | 34 |
| Obr. 8: Zavedení nové skupiny projektů | 35 |
| Obr. 9: Pojmenování nového projektu | 36 |
| Obr. 10: Pojmenování programu a volba jazyku POU | 36 |
| Obr. 11: Zavedení první instance programu | 37 |
| Obr. 12: Volba modelu PLC v regulované soustavě | 37 |
| Obr. 13: Specifikace centrální jednotky | 38 |
| Obr. 14: Připojení periferních modulů | 39 |
| Obr. 15: Volba periferních modulů | 40 |
| Obr. 16: Specifikace periferního modulu | 40 |

| | |
|--|----|
| Obr. 17: Připojení knihovny funkčních bloků | 41 |
| Obr. 18: Volba knihovní funkce | 42 |
| Obr. 19: Konečný řídicí program | 42 |
| Obr. 20: Lokální webová aplikace..... | 43 |
| Obr. 22: Krátká zkouška dvoupolohového řízení pomocí funkčního bloku Hyst31 | 44 |
| Obr. 21: Krátká zkouška spojitého řízení pomocí funkčního bloku PID11 | 47 |
| Obr. 23: Teplotní čidlo Regmet Pt1000 | 51 |
| Obr. 24: Kouřovodový tvarový prvek | 52 |
| Obr. 25: Kouřovodová klapka před implementací kovových přídavků | 53 |
| Obr. 26: Kouřovodová klapka před a po implementaci kovových přídavků | 53 |
| Obr. 27: Servomotor Belimo LM 230 A | 55 |
| Obr. 28: Analyzátor spalin testo 320-2 LL..... | 56 |
| Obr. 29: Graf regulace teploty dvoupolohovým řízením v závislosti na čase..... | 57 |
| Obr. 30: Graf regulace teploty spojitým řízením v závislosti na čase..... | 58 |
| | |
| Tab. 2: Proměnné funkčního bloku Hyst31 | 45 |
| Tab. 1: Proměnné funkčního bloku PID11 | 48 |
| Tab. 3: Vlastnosti servomotoru Belimo LM 230 A..... | 54 |
| Tab. 4: Konečné nastavení funkčního bloku PID11 | 62 |