

**SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA CHEMICKEJ A POTRAVINÁRSKEJ
TECHNOLÓGIE**

EVIDENČNÉ ČÍSLO: FCHPT-113709-43102

AUTOMATICKÁ PASTERIZAČNÁ LINKA

BAKALÁRSKA PRÁCA

2018

Kornel Bányi

**SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA CHEMICKÉJ A POTRAVINÁRSKEJ
TECHNOLÓGIE**

Evidenčné číslo: FCHPT-113709-43102

**AUTOMATICKÁ PASTERIZAČNÁ LINKA
BAKALÁRSKA PRÁCA**

Študijný program: automatizácia, informatizácia a manažment v chémii a potravinárstve

Študijný odbor: 5.2.14 automatizácia, 5.2.52 priemyselné inžinierstvo

Školiace pracovisko: Ústav informatizácie, automatizácie a matematiky

Vedúci záverečnej práce: Ing. Richard Valo, PhD.

Bratislava, 2018

Kornel Bányi



ZADANIE BAKALÁRSKEJ PRÁCE

Študent: **Kornel Bányi**
ID študenta: 43102
Študijný program: automatizácia, informatizácia a manažment v chémii a potravinárstve
Kombinácia študijných odborov: 5.2.14. automatizácia, 5.2.52. priemyselné inžinierstvo
Vedúci práce: Ing. Richard Valo, PhD.
Miesto vypracovania: Oddelenie informatizácie a riadenia procesov, FCHPT

Názov práce: **Automatická Pasterizačná Linka**

Jazyk, v ktorom sa práca vypracuje: slovenský jazyk

Špecifikácia zadania:

Pasterizácia je metóda tepelnej sterilizácie tekutých nápojov (alebo potravinárskych surovín), ktorú vyvinul v polovici 19. storočia francúzsky vedec Louis Pasteur.

Pasterizácia bude realizovaná na Tréningovej stanici (PCT23 od spoločnosti Armfield) v kombinácii priemysle používaných technológií (od spoločnosti B&R).

Úlohy:

1. Zoznámenie sa s technológiou
2. Návrh a implementácia nábehu
3. Návrh a implementácia regulácie

Rozsah práce: 30

Riešenie zadania práce od: 12. 02. 2018

Dátum odovzdania práce: 06. 05. 2018

Kornel Bányi
študent

prof. Ing. Miroslav Fikar, DrSc.
vedúci pracoviska

prof. Ing. Miroslav Fikar, DrSc.
garant študijného programu

Pod'akovanie

Touto cestou by som sa chcel pod'akovať vedúcemu a konzultantovi Ing. Richardovi Valovi, PhD. za pripomienky, odborné rady a trpezlivosť pri konzultovaní tejto záverečnej práce.

Abstrakt

Táto bakalárska práca je zameraná na automatizáciu pasterizačnej linky. V prvej časti sa venujeme teórii pasterizácie, čo zahŕňa dejiny, biologický princíp a typy pasterizácie. Nasleduje stručný opis PLC a predstavenie každej časti pasterizačnej linky PCT23. V praktickej časti riešime problematiku riadenia. Jedná sa o spracovanie jednotlivých signálov zo senzorov, riadenie akčných členov, návrh regulátorov, nábeh procesu a návrh riadnej prevádzky so zberom produktu.

Kľúčové slová: pasterizácia; PLC; PCT23; automatizácia

Abstract

This bachelor thesis is focused on the automation of the pasteurization line. In the first part we deal with pasteurization theory, which includes history, biological principle and types of pasteurization. Here is a short description of the PLC and the introduction of each part of the PCT23 pasteurization line. In the practical part we deal with management issues. These are the processing of each signals, design of regulators, production start and design of ordinary run with picking up the product.

Key words: pasteurization; PLC; PCT23; automation

Obsah

Zoznam skratiek a značiek	12
Úvod.....	14
1 Cieľ práce	15
2 Teoretická časť	16
2.1 Pasterizácia	16
2.1.1 Dejiny pasterizácie	16
2.1.2 Biologický princíp.....	16
2.1.3 Typy pasterizácie	18
2.2 PLC	19
2.3 Armfield: PCT23	21
2.3.1 Procesná jednotka	21
2.3.2 Riadiaca konzola	24
3 Praktická časť	30
4 Výsledky práce a diskusia	51
5 Záver.....	58
Zoznam použitej literatúry	59
Prílohy.....	60

Zoznam skratiek a značiek

aT	Prevodové číslo pri zberu dát zo snímačov teploty
Bool	Booleovský dátový typ
D	Dopravné oneskorenie
e	Regulačná odchýlka pri riadení kotla
ec	Regulačná odchýlka pri riadení čerpadla
fillb (SOL5)	Napúšťací ventil zásobníka suroviny
G	Prenosová funkcia
HL	Horný limitný senzor v zásobníku suroviny
HTST	Pasterizácia pri vysokej teplote a krátkom čase
Int	Celočíselný dátový typ
K, Z _R	Zosilnenie
Kp	Zosilnenie pri riadení kotla
Kpc	Zosilnenie pri riadení čerpadla
L	Výška hladiny v zbernej nádrži produktu v mm
lowlevel	Vyjadruje pravdivosť nedostatočnej hladiny vody v kotle
overtemp	Bezpečnostná hranica teploty v kotle
p_e	Regulačná odchýlka predošlého vzorkovania pri riadení kotla
p_ec	Regulačná odchýlka predošlého vzorkovania pri riadení čerpadla
P_M_int	Meraný výkon špirály v kotle (int)
P_M_real	Meraný výkon špirály v kotle (real)
P_S_int	Posielaný výkon do kotla (int)
P_S_real	Posielaný výkon do kotla (real)
PCT23	Zariadenie pasterizačnej linky
PLC	Programovateľný logický automat
pom	Pomocné premenné
pumpF_real	Otáčky peristaltického čerpadla suroviny
pumpW_real	Otáčky peristaltického čerpadla ohrevného média
Real	Dátový typ reálne číslo
SOL1	Elektromagnetický ventil na presmerovanie produktu
SOL2	Ventil s výberom napájania, nádrž A (produkt) / nádrž B (surovina)
SOL3	Elektromagnetický ventil na chladenie produktu
SP	Žiadaná teplota v kotle

SPc	Žiadaná teplota na konci pridrżovacej trubice
start	Signál zo zeleného tlačidla
stop	Signál z červeného tlačidla
T ₁	Teplota na výstupe z pridrżovacej trubice
T ₂	Teplota ohrevného média
T ₃	Teplota suroviny na výstupe z chladiacej časti výmenníka tepla
T ₄	Teplota suroviny na výstupe z ohrevnej časti výmenníka tepla
Ti	Integračná časová konštanta pri riadení kotla
Tic	Integračná časová konštanta pri riadení čerpadla
TON	Časovač
Tvz	Periódá vzorkovania
UP	Ultrapasterizácia
VDC	Napätie jednosmerného prúdu

Úvod

Výrobné procesy a technológia prešli veľkým vývojom v 20. storočí. Základom každej technologickej linky je z hľadiska prevádzkovateľa maximalizácia zisku, čo sa v dnešnej dobe rieši automatizáciou procesu. Pri automatizácii výrob sa využívajú rôzne senzory a akčné členy potrebné v procese pre najlacnejší a najrýchlejší priebeh výroby. Využívajú sa riadiace počítače, ktorými sú PLC. Pri automatizácii je však stále potrebný aj zásah človeka, napríklad pri plnení surovinou vsádzkových reaktorov, pri údržbe zariadení, pri kontrole kvality produktu či bezpečnosti chodu celého procesu.

Táto práca je zameraná na automatizáciu miniatúrnej verzie pasterizačnej linky. Náplňou bolo oboznámenie sa so zariadením a navrhnutie funkčného algoritmu na výrobu produktu. Riešili sme prepočet senzorov, nábeh a riadnu prevádzku. V nábehovej časti sme navrhli logické riadenie plnenia zásobníka surovinou, plnenie kotla vodou a zohriatie kotla na žiadanú teplotu. Riadnu prevádzku sme navrhli tak, že surovina sa čerpá zo zásobníka konštantnou rýchlosťou do výmenníka tepla. Na kotol sme navrhli PI regulátor z ktorého sa čerpá ohrevné médium do výmenníka tepla peristaltickým čerpadlom, ktorý ide na maximálny výkon, aby sa výmenník tepla čo najrýchlejšie predhrial. Keď surovina dosiahne v pridržovacej trubici na pasterizáciu pre nás najvhodnejšiu teplotu, tak sa zapne PI regulátor čerpadla. Chladenie produktu beží konštantne pri daných podmienkach, aby sme sa najviac priblížili teplote chladenia pri pasterizácii. Prevádzka sa vypne, ak sa nazbiera 200 mm produktu v zbernej nádrži, stlačí sa červené tlačidlo alebo sa kotol prehreje na kritickú hodnotu.

Náplňou však nebolo dosahovanie pasterizačnej teploty, chladenia a ani presné dodržanie zdržného času.

1 Cieľ práce

Cieľom práce bolo zoznámiť sa s technológiou a pasterizačnou linkou PCT23, následný nábeh a riadna prevádzka s produkováním pasterizovanej suroviny do výšky 200 mm v zbernej nádrži. Ako pri nábehu, tak i pri normálnej prevádzke bolo cieľom navrhnuť riadenie pre každú časť zariadenia, a to riadenie zásobníka suroviny, kotla, výmenníka tepla, dvoch peristaltických čerpadiel a riadenie produktu v zmysle, či pasterizácia prebehla kvalitne. Pri riadení procesu bolo cieľom navrhnuť aj jednoduchú bezpečnosť chodu zariadenia.

2 Teoretická časť

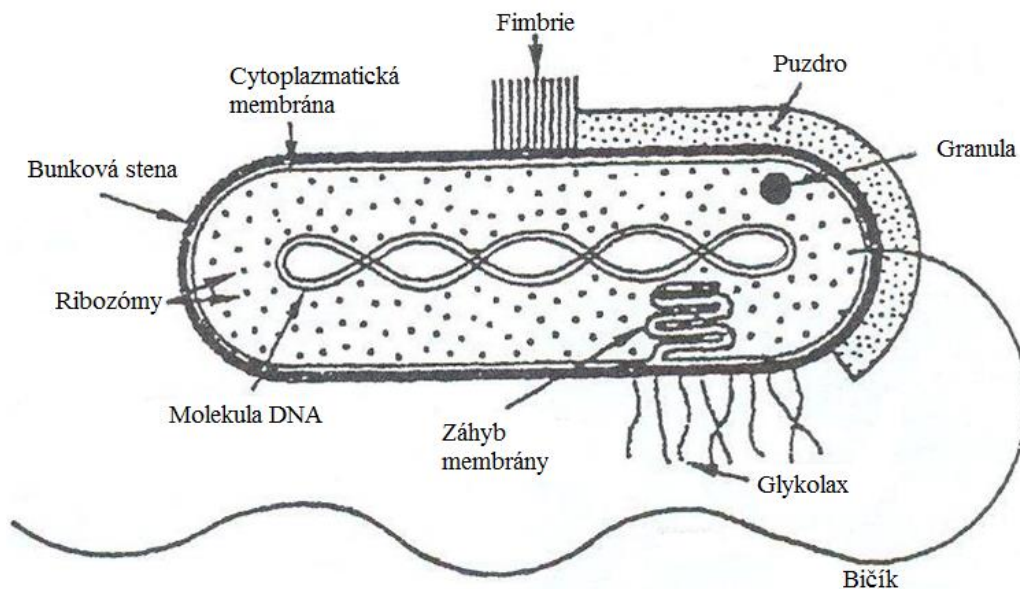
2.1 Pasterizácia

2.1.1 Dejiny pasterizácie

Na začiatku 19. storočia sa vo Francúzsku po každom jedle pilo víno a považovali ho za zdravší nápoj ako vodu. V tom čase nevedeli nič o množení buniek, nevedeli ako sa kazia potraviny, nápoje a prečo vzniká z vína ocot. Louisa Pasteura v roku 1856 požiadal výrobca alkoholu, aby zistil, čo spôsobuje skysnutie alkoholu. Vtedy si vedci mysleli, že kvasenie je čisto chemický proces, ale Pasteur zistil, že sú k tomu potrebné živé mikroorganizmy, ktoré premenia sladký džús na alkoholický nápoj. Tieto kvasinky boli okrúhle. Keď bol alkohol zahmlený, tak pod mikroskopom zistil, že mikróby sú tyčového tvaru, čo spôsobilo kazenie vína. Pasteur zistil, že zahriatie fermentovaného vína zabije mikróby. Jeho príspevkom bolo aj určenie presného času a teploty zahriatia, aby víno nezmenilo chuť a zloženie. Proces patentoval a nazval ho pasterizáciou, neskôr ho využil aj na pivo a ocot.

2.1.2 Biologický princíp

Baktéria je tvorená bunkovou obálkou, cytoplazmou a často aj bičíkom. V cytoplazme prebiehajú procesy generujúce energiu akým je fotosyntéza a respirácia. Cytoplazma sa vzťahuje na všetko v bunke, čo ju drží nažive, zmes vody, ribozómov, chromozómov, živín a enzýmov. Enzýmy sú obzvlášť dôležité, pretože sú katalyzátormi metabolických procesov. Bičíky sú malé chvostíky na vonkajšej strane baktérie, ktoré jej pomáhajú pohybovať sa, pripevňovať sa k povrchom alebo odrážať od seba nepriateľov. [1] Na Obr. 1 je znázornená bunka baktérie.



Obr. 1 Bunka baktérie [2]

Ak je teplota dostatočne vysoká, enzýmy sa denaturujú, čím stratia biochemickú aktivitu a bunka jednoducho prestane fungovať. V dôsledku vysokej teploty stratia svoj tvar aj bielkoviny a mastné kyseliny, ktoré tvoria bunkovú stenu, zároveň tekutina vo vnútri bunky expanduje a tlačí na oslabenú bunkovú stenu, kým sa bunka neroztrhne. Termofilné baktérie sú však odolnejšie voči vysokej teplote. Ich množeniu sa dá zabrániť následným konštantným chladením.

Kvôli tepelnej kinetike baktérií pasterizácia pri danej teplote musí trvať istý minimálny čas, čo sa v mikrobiológii určí pomocou D-hodnoty. D-hodnota vyjadruje minimálny čas na zabitie 90% nejakého druhu baktérií pri určitej teplote, čím vyššia je teplota, tým menšia je D-hodnota.

Pasterizácia mlieka zabije najviac tepelne senzitívnych patogénov, ale pri tom zachová vlastnosti mlieka, ktoré konzumenti vyžadujú: krémová textúra, čerstvá aróma a mliečna farba.[1]

2.1.3 Typy pasterizácie

V potravinárskom priemysle sa dnes najčastejšie využívajú tri typy pasterizácie:

- Vsádzková pasterizácia

Je to jemnejší, ale drahší typ pasterizácie, kde sa nádoba s mliekom zohreje na 63 °C na dobu 30 minút a následne sa schladí na 4°C.

- Ultrapasterizácia – UP

Počas tejto metódy sa mlieko zohreje na 138°C iba na 2 sekundy. Väčšina predaného mlieka bola pasterizovaná práve takouto formou, pretože je najrýchlejšia a najlacnejšia. Takto vzniknuté mlieko má trvanlivosť približne 2 mesiace.

- Pasterizácia pri vysokej teplote a krátkom čase – HTST

Táto metóda vyžaduje, aby sa mlieko zohrialo na teplotu 72 °C na dobu 15-16 sekúnd. Metóda je kontinuálna, kde mlieko preteká cez kovové rúrky a teplo je dodané zvonka a po uplynutí času sa rýchlo schladí na 4°C. [3] Vyššou teplotou dostane mlieko mierne varenú príchuť, ale táto metóda sa využíva už dlho, tak si ľudia na tú chuť zvykli. [1]

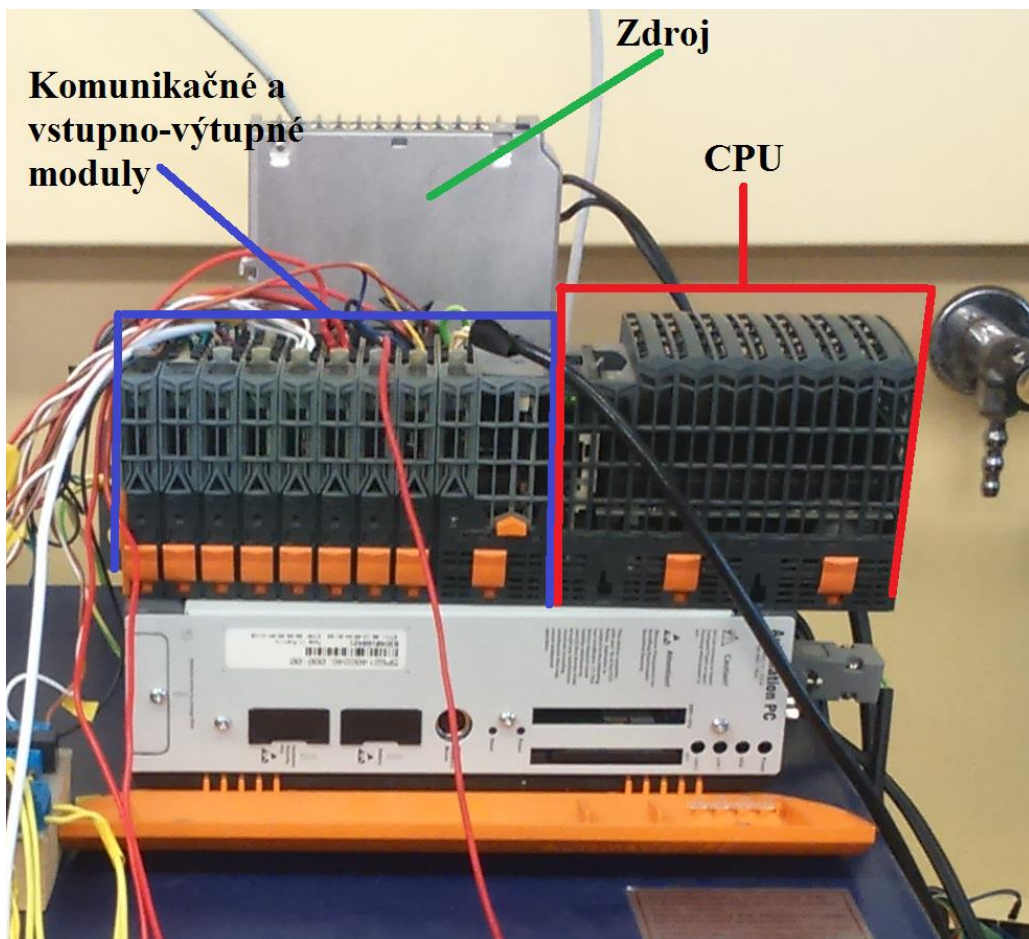


Obr. 2 Zariadenie na HTST v praxi [4]

2.2 PLC

PLC je programovateľný logický regulátor, čo je priemyselný počítačový riadiaci systém, ktorý priebežne sleduje stav vstupných zariadení a prijíma rozhodnutia na základe vlastného programu na riadenie stavu výstupných zariadení. Takmer všetky výrobné linky, stroje môžu zvýšiť efektivitu pomocou tohto typu riadiaceho systému. [5]

PLC pozostáva zo zdroja napätia, CPU a komunikačných vstupno-výstupných modulov, čo je znázornené na Obr. 3. Na Obr. 4 a 5 je všeobecná ukážka automatizácie z potravinárstva a priemyslu.



Obr. 3 Komponenty PLC nášho procesu



Obr. 4 Automatizácia v potravinárskom priemysle [6]



Obr. 5 Automatizácia v priemysle [7]

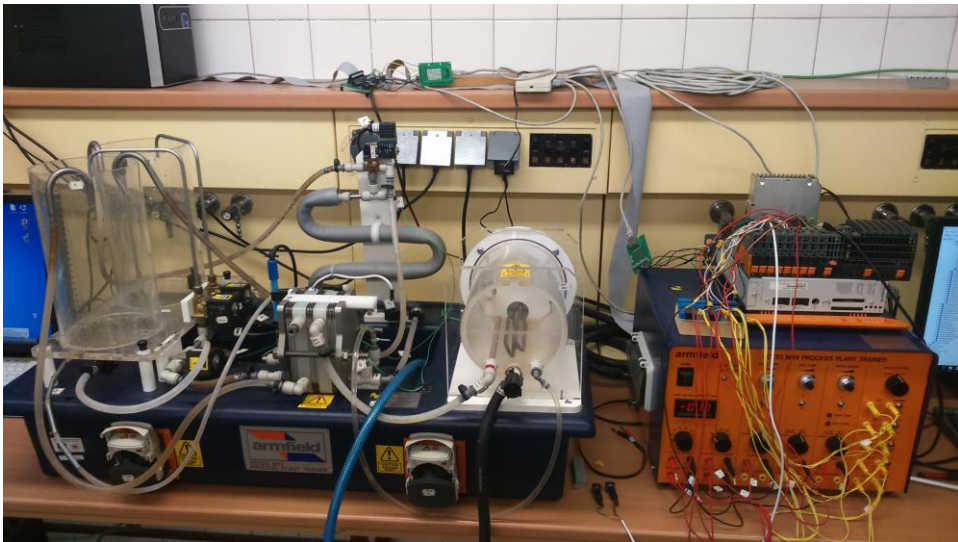
2.3 Armfield: PCT23

2.3.1 Procesná jednotka

Proces pasterizácie budeme simulovať na tréningovej stanici PCT23 od spoločnosti Armfield, ktorá je miniatúrna replikácia skutočného procesu. PCT23 slúži ako demonštrácia metód riadenia procesov s realistickým dynamickým správaním a nestabilitou, kde môžeme využiť manuálne riadenie, jednorázovú spätnú väzbu, sofistikované kaskádové slučky a riadenie procesu vzdialene umiestneným počítačom.

Na prístroji sa dá pracovať s mnohými rôznymi stratégiami riadenia, kde môžeme využiť nasledujúce:

- Viac vstupov, viac senzorov, viacnásobné riadiace stratégie
- Môžu byť zavedené smery regulácie teploty, hladiny, prietoku a vodivosti
- Účinky „dead time“
- Prevádzkové sekvencovanie vrátane od spustenia do vypnutia
- Dôsledky recyklácie pri riadení procesov
- Zap/vyp, proporcionovanie, PID, PLC, SCADA
- Simulácia chýb a diagnostika
- Zahŕňa rozhranie počítača cez USB port a softvér na zaznamenávanie údajov [8]



Obr. 6 Tréningová stanica Armfield PCT23

Prúdová schéma procesu je znázornená na Obr. 7, jednotlivé časti pasterizačnej linky sú na Obr. 8, kde je každá časť označená číslom v krúžku. V nasledujúcom opise to vyjadruje číslo v zátvorkách. PCT23 pozostáva z dvoch zásobníkov kvapaliny (6), trojstupňového nepriameho doskového výmenníka tepla (3), udržiavacej trubice (4) a nádoby pre ohrevné médium namontované na podstavci ABS (1). Procesná jednotka obsahuje nasledujúce ventily ovládané solenoidmi, ktoré umožňujú diaľkové ovládanie prostredníctvom ovládacej konzoly alebo počítača:

- Elektromagnetický ventil na presmerovanie produktu (SOL 1)
- Navigačný ventil s výberom napájania, nádrž A / nádrž B (SOL 2)
- Elektromagnetický ventil na chladenie produktu (SOL 3)
- Solenoidový ventil nádrže A (SOL 4)
- Magnetický ventil nádrže B (SOL 5, v softvéri fillb)

Nádrž A sa v našom algoritme využíva na zber produktu a nádrž B je zdrojom suroviny.

Na procesnej jednotke sú umiestnené dve peristaltické čerpadlá:

- Čerpadlo suroviny (N1, v softvéri pumpF)
- Čerpadlo ohrevného média (N2, v softvéri pumpW)

Prietok studenej vody chladiaceho úseku riadi ventil na reguláciu prietoku (V1).

Procesná jednotka obsahuje nasledujúce snímače:

Snímače teploty

Teploty sú monitorované štyrmi teplotnými senzormi ($T_1 - T_4$) v kľúčových bodoch procesu a poskytujú nasledovné informácie:

T_1 Teplota na výstupe z pridržiavacej trubice

T_2 Teplota ohrevného média

T_3 Teplota suroviny na výstupe z chladiacej časti výmenníka tepla

T_4 Teplota suroviny na výstupe z ohrevnej časti výmenníka tepla

Signál každého snímača teploty poskytuje priame meranie teploty v procesnom potrubí v rozsahu 0-150 °C

Senzor vodivosti C_1

Snímač C_1 meria vodivosť ochladeného produktu v rozsahu 0 – 200mS/cm.

Senzor prietoku F_1

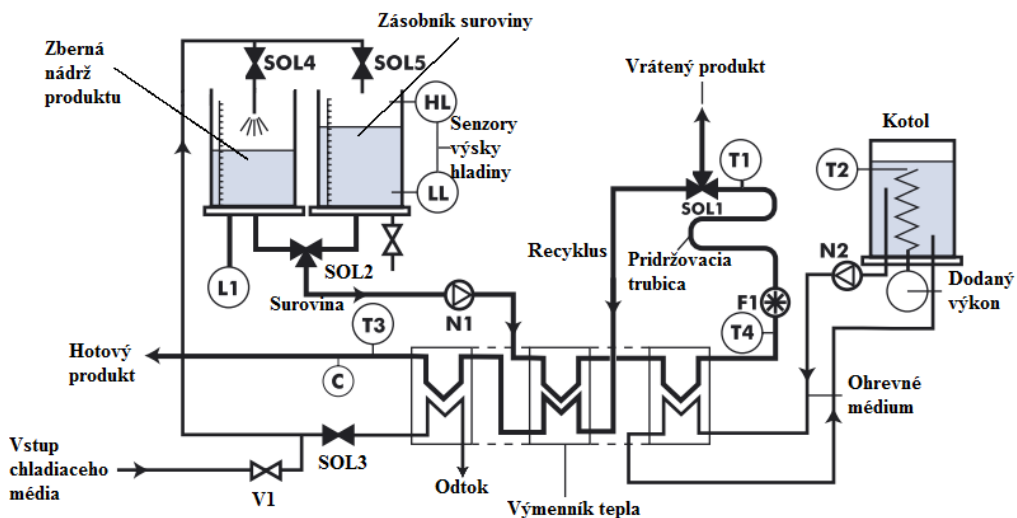
Senzor F_1 meria prietok produktu pri vstupe do udržiavacieho potrubia v rozsahu 0 – 500 ml/min, ktorý má aj zabudovaný filter, aby sa zabránilo vniknutiu nečistoty do senzoru.

Snímač hladiny L_1

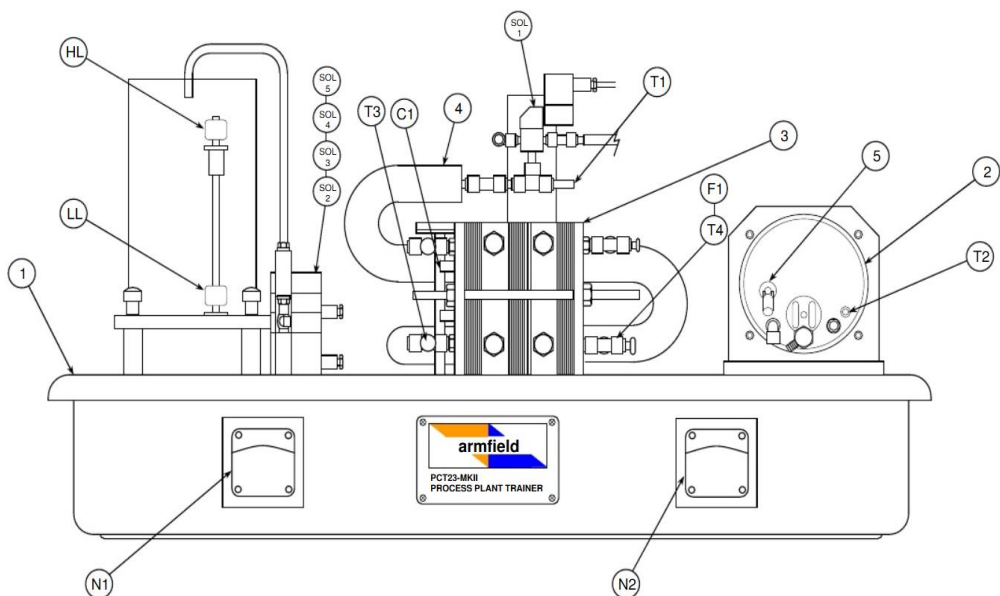
Snímač tlaku L_1 je pripojený k odtoku v základni zásobníka A. Signál z tohto senzoru poskytuje priame meranie výšky hladiny kvapaliny v nádrži v rozsahu 0 – 250 mm.

Plavákové spínače LL a HL

Dolný limitný senzor LL detekuje nízku hladinu v napájacej nádrži B, horný limitný senzor HL detekuje prakticky úplné naplnenie nádrže B. [8]



Obr. 7 Prúdové schéma procesu [8]



Obr. 8 Jednotlivé časti pasterizačnej linky [8]

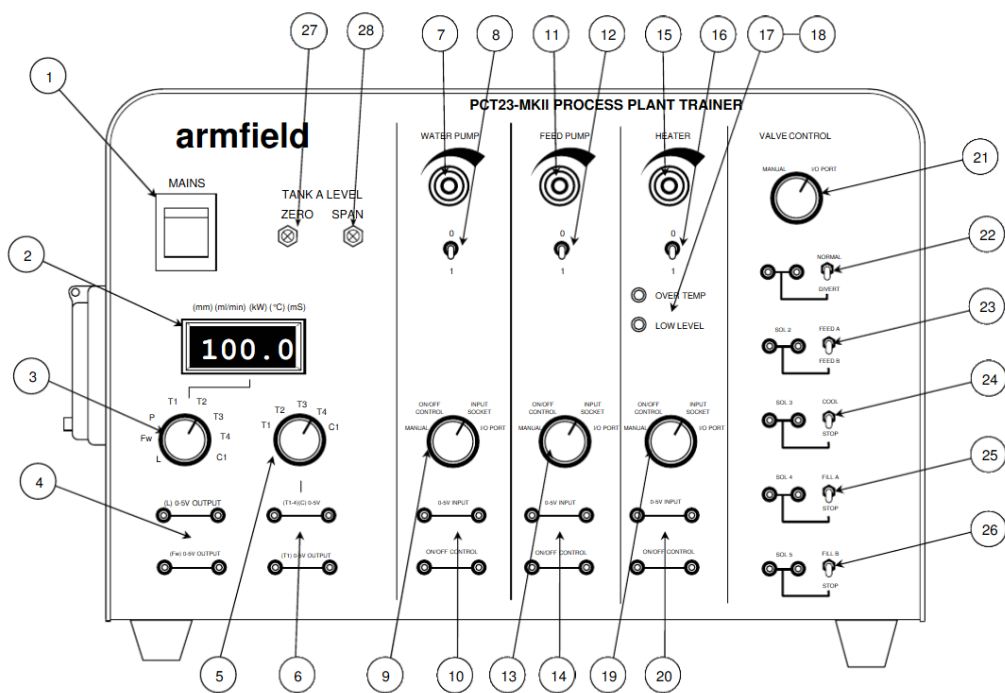
2.3.2 Riadiaca konzola

2.3.2.1 Predná časť riadiacej konzoly

Predný panel riadiacej konzoly je zobrazený na Obr. 9, kde je každá časť označená číslom v krúžku. V nasledujúcom opise to vyjadruje číslo v zátvorkách. Riadiaca konzola poskytuje prístup k rôznym signálom spojeným s meraním a riadením procesu a umožňuje demonštráciu rôznych kontrolných techník vrátane priemyselných regulátorov alebo priameho digitálneho ovládania pomocou počítača. Ovládače dodané spoločnosťou Armfield sa môžu nahradiť aj vlastnými regulátormi za predpokladu, že vstupné a výstupné signály sú prispôbené na 5VDC.

Konzola sa zapína hlavným spínačom (1). Viacúčelový displej (2) zobrazuje hodnotu zo snímača zvoleného na viacpolohovom spínači (3). Senzor hladín je možno kalibrovať pomocou „nuly“ (27) a rozpätia (28). Konzola má štyri sady výstupných zásuviek v rozsahu 0 – 5 V, pričom jeden (6) z nich je voliteľný pomocou druhého viacpolohového spínača (5). Čerpadlo ohrevného média sa dá kontrolovať pomocou potenciometra (7) a zapínacieho spínača (8).

Alternatívne sa môže voliť spínačom (9) ovládanie čerpadla cez dve sady vstupných zásuviek (10) alebo cez I/O port na zadnej strane konzoly. Podobné ovládacie prvky (11 – 14) sú určené pre napájacie čerpadlo. V manuálnom režime je ohrievač vody riadený potenciometrom (15) a zapínacím spínačom (16). LED diódy zobrazujú poruchy pre veľmi vysokú teplotu (17) a nízku hladinu ohrevného média (18). Ostatné režimy ovládania sa vyberajú viacpolohovým spínačom (19). Vstupné zásuvky sú k dispozícii v rozsahu 0 – 5 V pre riadenie zapnutia a vypnutia (20). Elektromagnetické ventily na PCT 23 sa ovládajú pomocou spínačov (22), (23), (24), (25), (26) v manuálnom režime. Ak je spínač (21) v polohe I/O port, ventily sú ovládané z jedného z portov na zadnej strane konzoly. [8]



Obr. 9 Predná časť riadiacej konzoly [8]

2.3.2.2 Bočná časť riadiacej konzoly

Elektrické poruchy môžu byť zavedené do niektorého z meracích alebo riadiacich signálov nízkeho napätia pomocou simulátora poruchy signálu a simulátora poruchy DC umiestneného na bočnej strane ovládacej konzoly. Čitateľ si to môže pozrieť na Obr. 10. Poruchy môžu byť zavedené jednotlivo alebo v kombinácii.

Spínače poruchy signálu fungujú nasledovne :

Spínač v strednej polohe – zlý signál, 0VDC

Spínač v dolnej polohe – zlý signál, v hornom rozsahu (1,5 – 5VDC)

Spínač v hornej polohe – správny signál

Poruchy analógového signálu:

- | | |
|---|----------------|
| 1 | L ₁ |
| 2 | F ₁ |
| 3 | T ₁ |
| 4 | T ₂ |
| 6 | T ₃ |
| 5 | T ₄ |
| 7 | T ₅ |

Poruchy digitálneho signálu:

- | | |
|---|---|
| 1 | Prehriatie ohrevného média (Overtemp) |
| 2 | Nízka hladina ohrevného média (Low Level) |
| 3 | LL |
| 4 | HL |

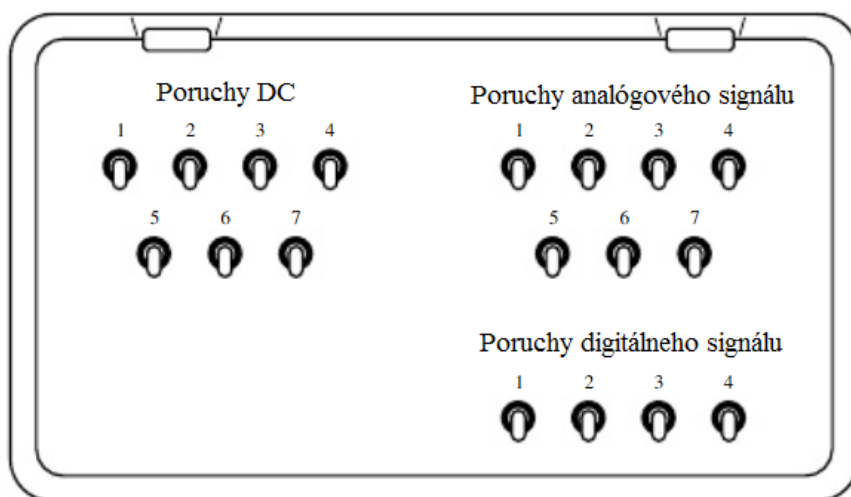
DC chybové spínače fungujú nasledovne:

Spínač v hornej polohe – prívod poškodený

Spínač v dolnej polohe – prívod zapojený

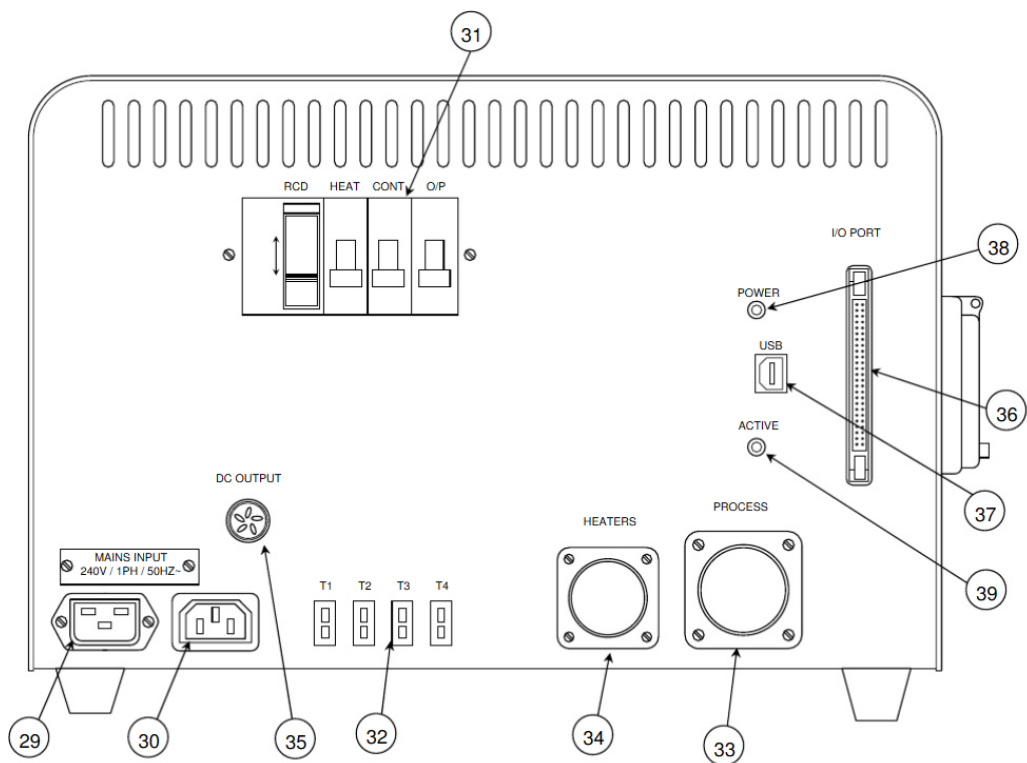
Poruchy DC:

- | | |
|---|--|
| 1 | N1 (pumpF), zlé otáčky motora čerpadla |
| 2 | N2 (pumpW), zlé otáčky motora čerpadla |
| 3 | SOL1 |
| 4 | SOL2 |
| 6 | SOL3 |
| 5 | SOL4 |
| 7 | SOL5 (fillb) [8] |



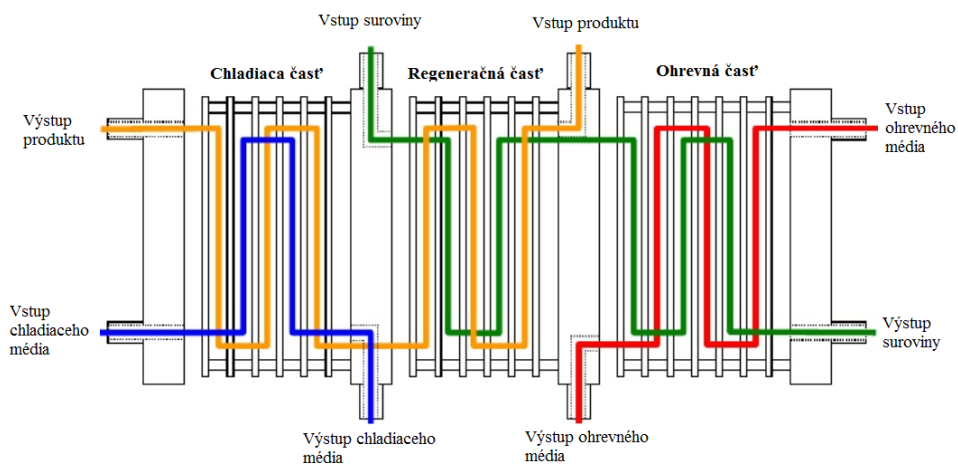
Obr. 10 Bočná strana riadiacej konzoly [8]

Na zadnej strane konzoly PCT23 je umiestnená hlavná zásuvka (29) a konektor (30). Na ochranu používateľa sú namontované ističe a tri miniatúrne ističe (31). Pripojenie k procesnej jednotke sa uskutočňuje prostredníctvom štyroch termočlánkových zásuviek (32), 40 pinového procesného konektora (33), dvoch konektorov ohrievača (34) a DC výstupu. Pripojenie signálu je možné vykonať prostredníctvom 50 pinového I/O portu (36) alebo USB portom (37). Keď je USB pripojený k počítaču, potom sa červený zapínací LED (38) a zelený aktívny LED (39) rozsvieti, čo znamená, že sa používa pre všetky riadiace funkcie USB. Ak LED diódy nesvietia, tak sa používa 50 pinový konektor na riadenie. Zadná časť riadiacej konzoly ja na Obr. 11. [8]



Obr. 11 Zadná časť riadiacej konzoly [8]

Prúdy vo výmenníku tepla



Obr. 12 Prúdové schéma nepriameho výmenníka tepla [8]

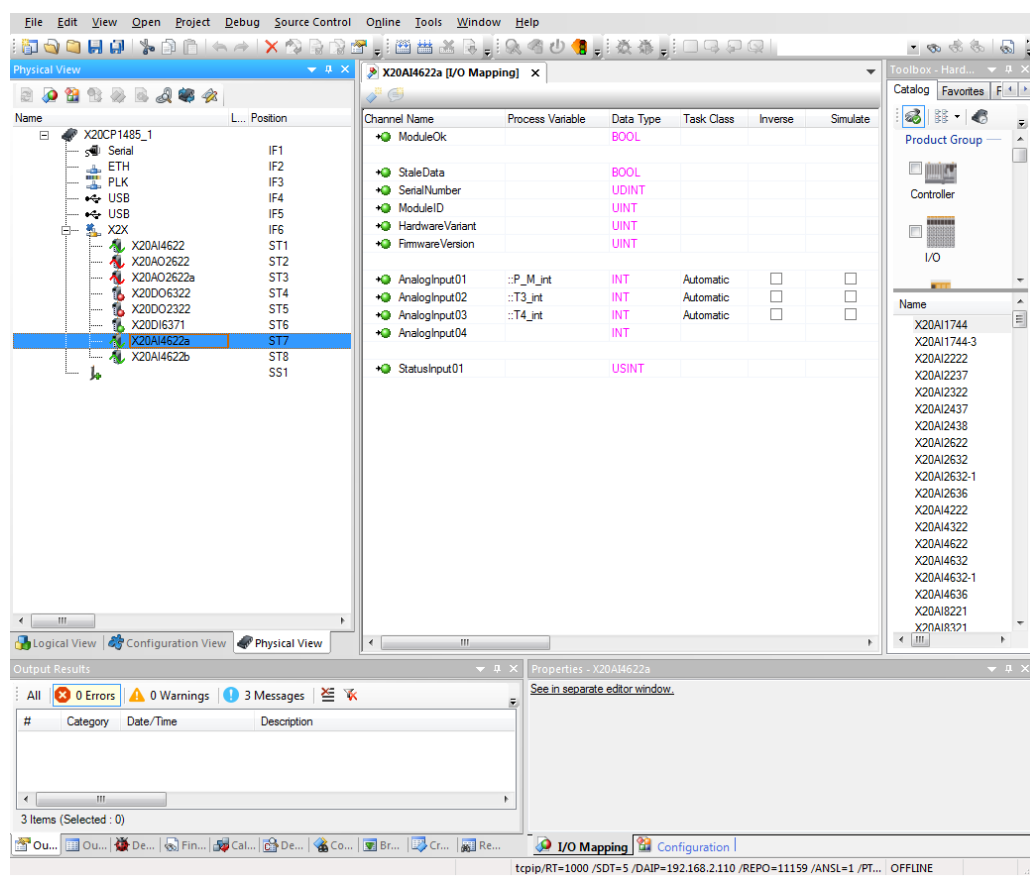
Výmenník tepla pozostáva z troch častí: chladiaca, regeneračná a ohrevná časť. Surovina vstupuje do strednej regeneračnej časti výmenníka, kde prebieha predhrev pomocou produktu (už zohriata surovina). Týmto spôsobom šetríme tepelnou energiou, keďže produkt, ktorý sa má ešte schlaadiť, odovzdáva tepelnú energiu surovine, ktorá sa má zohriať. Predhriata surovina prejde do pravej časti výmenníka, kde prebehne nepriamo ohrev pomocou zohriatej vody z kotla. Zohriaty produkt ide ďalej do systému na vyhodnotenie teploty, ak je vyhovujúca, tak prejde do ľavej chladiacej časti výmenníka tepla, kde sa schladí vodou z vodovodu. Táto prúdová schéma je znázornená na Obr. 12. [8]

Simulácia na pasterizačnej linke PCT 23 však nie je presný proces pasterizácie, iba jej demonštrácia, v prvom rade preto, lebo vo výmenníku tepla surovina nedosahuje požadovanú teplotu 72°C, v druhom rade preto, lebo ju chladíme vodou z vodovodu, ktorá má teplotu približne 13 °C namiesto 4 °C a v treťom rade preto, lebo sa v tejto práci neriešil zdržný čas pasterizovanej suroviny. [3]

3 Praktická časť

Na začiatok práce potrebujeme identifikovať, že ktorý senzor a akčný člen je na ktorý modul a presne kde pripojený. Stačí sa pozrieť, kam idú káble z ovládacej konzoly do PLC (Obr. 3 a 6). V druhom kroku v programe B&R:Automation Studio v *Logical View* vytvoríme globálne premenné pre každý potrebný senzor, potrebnú premennú, akčný zásah a stav, v ktorom sa náš algoritmus môže nachádzať. Následne senzory a akčné zásahy vo *Physical View* zadefinujeme do konkrétneho kanála daného modulu.

Rozhranie softvéru a zadefinovanie senzorov vo *Physical View* je vidno na Obr. 13.



Obr. 13 Rozhranie softvéru B&R: Automation Studio

Signály z každého snímača a akčného člena treba previesť na reálne čísla. Všetky štyri snímače teploty dokážu zaznamenať teplotu v rozsahu 0°C až 150 °C , kde dolná hranica reprezentuje celé číslo 0 a horná hranica 150°C celé číslo 16384, čo zodpovedá elektrickému signálu 5V. Na základe týchto údajov dokážeme vypočítať prevodové číslo a_T z rovnice priamky:

$$y(0^{\circ}\text{C}) = a_T \cdot x(0^{\circ}\text{C}) + b \quad (\text{R.1})$$

$$y(150^{\circ}\text{C}) = a_T \cdot x(150^{\circ}\text{C}) + b \quad (\text{R. 2})$$

Riešením (R. 1) a (R. 2) sme dostali, že $b=0$ a $a_T = \frac{150}{16384}$.

Skutočnú hodnotu nameranú teplomerom T_1 zo snímaných veličín uložíme do reálnej premennej pre T_1 a do programu zapíšeme v tvare $T1_real = a_T \cdot \text{REAL}(T1_int)$. Pre zvyšné teplomery a teploty postupujeme analogicky.

Analogickou úvahou sme vytvorili premenné pre jednotlivé čerpadlá pre rozsah 0% až 100%:

$\text{pumpF_int} = \text{INT}(\text{pumpF_real}/100.0 \cdot 16384.0),$

$\text{pumpW_int} = \text{INT}(\text{pumpW_real}/100.0 \cdot 16384.0).$

Zberná nádrž má tlakový senzor, na základe čoho dokážeme merať výšku hladiny v nej. Reálna premenná výšky hladiny v zbernej nádrži má tvar: $L_real = 250.0/16384.0 \cdot \text{REAL}(L_int)$.

PLC má na ohrev k dispozícii vstupný kanál na meranie výkonu a výstupný kanál na posielanie výkonu, obe sú po spracovaní elektrického signálu v softvéri celočíselného dátového typu. Meraný výkon v softvéri pre daný modul dostal premennú P_M_int a poslaný výkon P_S_int , ktorým treba priradiť číselné hodnoty reálneho dátového typu také, aby sa zo softvéru posielaný výkon (real) zhodoval s číslom na displeji riadiacej konzoly. Na uskutočnenie kalibrácie je potrebné zmerať, že k danej hodnote posielaného výkonu (integer) aká hodnota prislúcha na displeji a akú hodnotu má meraný výkon (integer). Číselné hodnoty sú zhrnuté v tabuľke 1.

Tab. 1 Údaje pre synchronizáciu výkonu

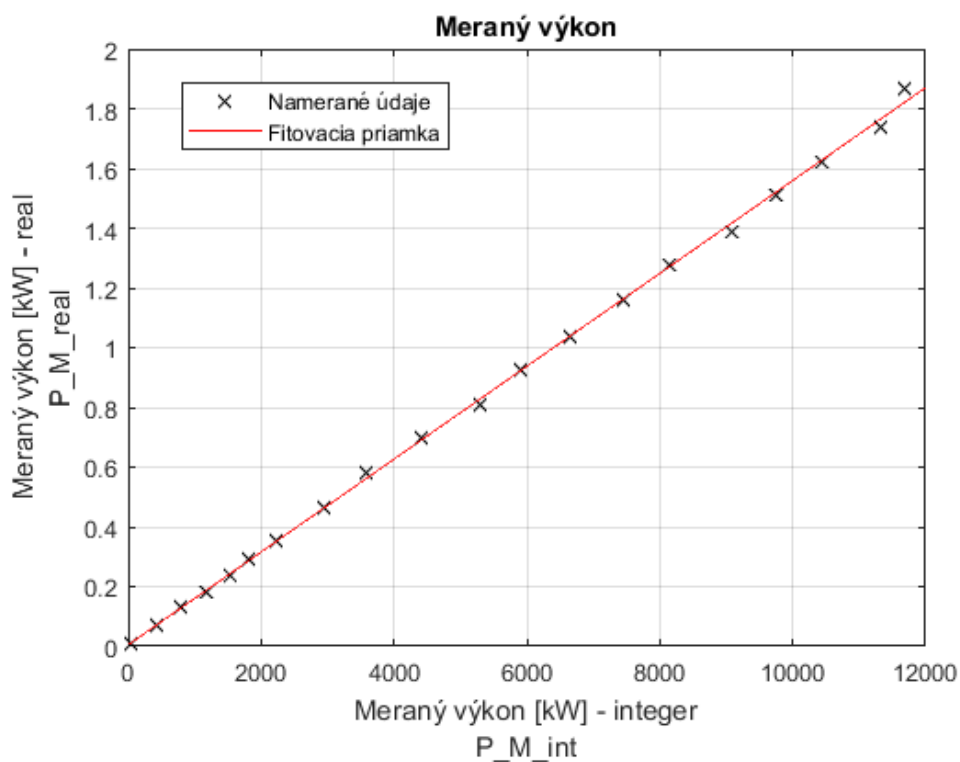
Displej P_S_real, P_M_real	P_S_int	P_M_int
0.01	0	29
0.07	500	442
0.13	1000	798
0.18	1500	1170
0.235	2000	1542
0.29	2500	1808
0.355	3000	2233
0.465	4000	2933
0.58	5000	3570
0.70	6000	4405
0.81	7000	5296
0.925	8000	5893
1.04	9000	6637
1.16	10000	7451
1.28	11000	8143
1.39	12000	9095
1.51	13000	9745
1.62	14000	10445
1.74	15000	11311
1.87	16384	11672

Kedže hodnoty P_M_int boli na začiatku zašumené, vytvorili sme skript na počítanie strednej hodnoty. Pri stlačení zeleného tlačidla sa zapísala minimálna hodnota do jednej premennej a maximálna hodnota do druhej premennej pre konkrétny posielaň výkon, z čoho sa vyrátal aritmetický priemer. Ten je zapísaný v tabuľke 1 v stĺpci P_M_int.

Vytvorili sme graf $P_M_real = f(P_M_int)$ (Obr. 14), kde sme nafitovali namerané údaje priamkou, ktorý mal tvar:

$$P_M_real = 0.0002 \cdot P_M_int + 0.0047 \quad (R. 3)$$

a v softvéri sme vytvorili pomocou nej premennú P_M_real.

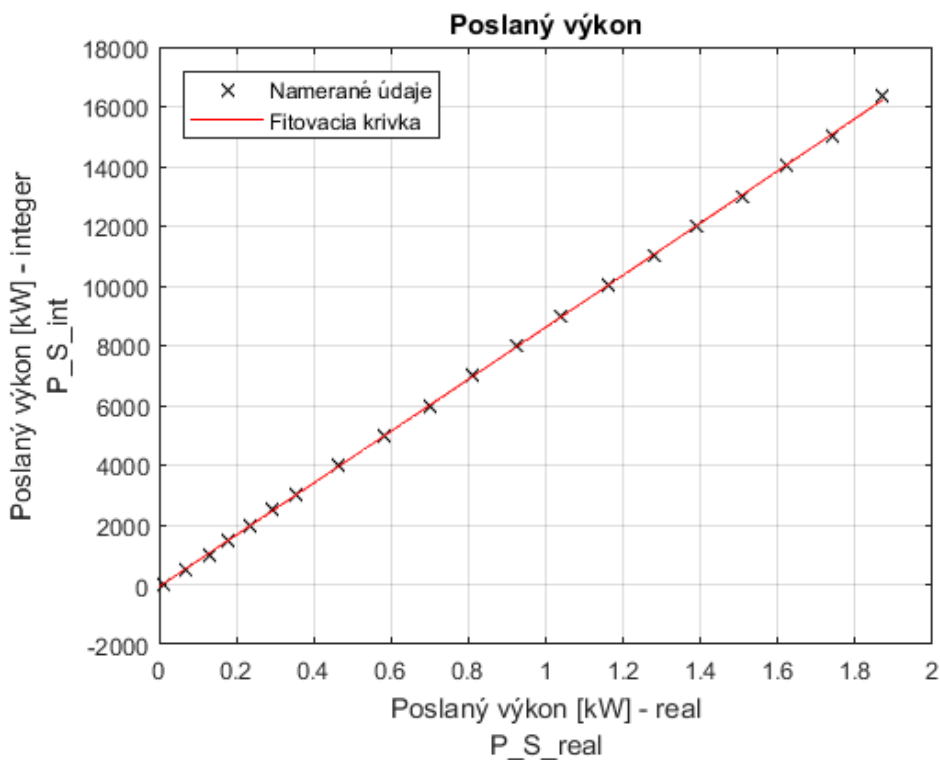


Obr. 14 Meraný výkon

Analogicky sme vytvorili aj graf $P_{S_int} = f(P_{S_real})$ (Obr. 15), kde sme nafitovali namerané údaje kvadratickou rovnicou, ktorá mala tvar:

$$P_{S_int} = 28.6 \cdot P_{S_real}^2 + 8657.5 \cdot P_{S_real} - 66.7 \quad (R. 4)$$

a v softvéri sme vytvorili pomocou nej premennú P_{S_int} .



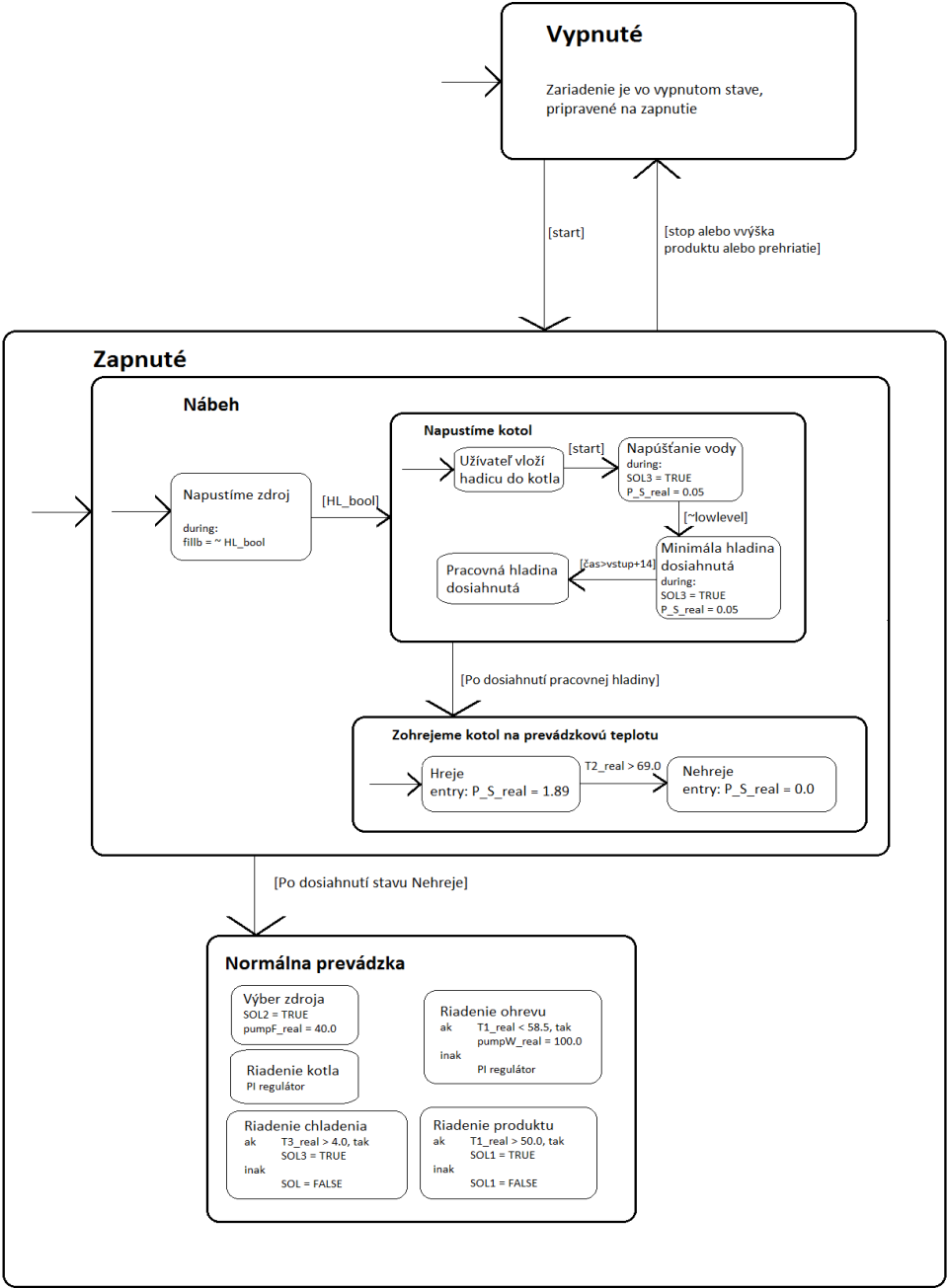
Obr. 15 Poslaný výkon

V ďalšom kroku sme zabezpečili, aby sme pri jednotlivých akčných členoch zostali v ich pracovnom rozsahu, t.j. pri predpoklade, ak by sme poslali do kotla vyšší výkon ako 100%, tak to zoberie ako 100% (1.89 kW). Postup je rovnaký aj pri dolnej hranici pracovného intervalu.

Pasterizačná linka PCT 23 má 2 nádrže, nádrž A a nádrž B. Našou ďalšou úlohou je rozhodnúť, že ktorá nádrž bude zdrojom a do ktorej budeme privádzať pasterizovaný produkt. V našom riešení je nádrž B zdrojom suroviny, ktorý má 2 senzory, dolný limitný senzor (LL) a horný limitný senzor (HL) hladiny kvapaliny. Nádrž A použijeme ako zbernú nádrž produktu.

Zjednodušene povedané proces pasterizácie prebehne tak, že sa nádrž B napustí surovinou a kotol vodou, ktorá sa zohreje. Zohriata voda z kotla sa čerpá cez pravú časť nepriameho výmenníka tepla a vracia sa naspäť do kotla, kde je udržiavaná na požadovanej teplote. Surovina sa čerpá z nádrže B čerpadlom do regeneračnej časti výmenníka tepla, kde prebieha predhrev, čiže už zohriaty produkt odovzdá časť svojho tepla vstupujúcej surovine (Obr. 12). Ak surovina na výstupe z udržiavacej trubice nedosiahne požadovanú teplotu, tak sa vráti do nádrže B, ak dosiahne požadovanú teplotu, tak sa v ľavej časti výmenníka tepla ochladí, kam sa privádza ako chladiace médium voda z vodovodu.

Na nasledujúcej schéme (Obr. 16) je znázornené navrhnuté riadenie. Názvy v schéme sa mierne líšia od názvov v softvéri pre lepšie znázornenie algoritmu.



Obr. 16 Schéma riadenia pasterizačného procesu

Riadenie má dva hlavné stavy, buď je vypnutý alebo zapnutý. V inicializácii majú potrebné pomocné premenné a vypnutý stav logickú hodnotu 1, zapnutý stav, normálna prevádzka a neskôr použitý časovač majú logickú hodnotu 0. To znamená, že počiatočným stavom je vypnutý stav, kde sú zastavené: prítok vody do systému, ventily a obe čerpadlá. Ak sa stlačí zelený štartovací gombík, dostaneme sa do druhého hlavného stavu, zapnutý, kde priradíme pomocnej štartovacej premennej a vypnutému stavu logickú hodnotu 0. Zapnutý stav má 2 vnorené stavy, nábeh a normálnu prevádzku. Pomocou pomocnej zapínacej premennej inicializujeme nábeh, následne pomocnú premennú deaktivujeme. Samotný nábeh pozostáva z ďalších 3 stavov: prvý pre napustenie nádrže B surovinou, druhý pre napúšťanie kotla vodou a tretí pre zohriatie vody v kotle. Prechod medzi týmito stavmi je sériový, aby mohla obsluha reagovať v správnom čase, keby nastala porucha.

Inicializovaný stav je napúšťanie nádrže B, kde sme v algoritme použili iba horný limitný senzor. Na logické riadenie výšky hladiny zásobníka potrebujeme signál poslaný zo senzoru do softvéru previesť na binárnu premennú `HL_bool`, čiže ak je hodnota reálneho signálu väčšia ako 5000, pri ktorom máme istotu, že senzor nie je aktivovaný, tak priradíme `HL_bool` nepravdivú hodnotu, v opačnom prípade je pravdivá. Za akčný zásah plnenia danej nádrže zodpovedá premenná `fillb` a riadiaci algoritmus je `fillb=not(HL_bool)`. To znamená, že sa nádrž bude plniť, kým sa nezopne horný limitný senzor, vtedy bude hodnota `HL_bool` pravdivá a `fillb` nepravdivá. Pri deaktivácii `HL_bool` sa opäť aktivuje premenná `fillb` pre napĺňanie nádrže.

Pri prvom aktivovaní horného limitného senzora sa aktivuje stav napúšťania kotla, ktorý sa skladá zo 4 stavov. V prvom z nich sa čaká, kým užívateľ vloží hadicu do kotla a potvrdí to stlačením zeleného tlačidla, následne sa dostaneme do ďalšieho stavu, kde sa aktivuje napúšťanie kotla vodou pri posielaní veľmi malého ohrevného výkonu. Malý dodaný výkon súvisí s odchodovou podmienkou z tohto stavu. Ku kotlu prislúchajú na riadiacej konzole 2 svetelné indikácie, jedna pre prehriatie (`over temp`) a druhá pre nedostatočnú hladinu vody (`low level`), ktoré je vidieť na Obr. 17. Svetelná indikácia prehriatia sa rozsvieti, ak ohrevné médium dosiahne $\sim 82^{\circ}\text{C}$ a ohrev sa automaticky vypne. Táto funkcia je to zabudovaná dodávateľom. Svetelná indikácia nízkej hladiny vody v kotle svieti, kým voda nedosiahne nejakú minimálnu hladinu potrebnú na začatie ohrevu, bez tohto ohrev nie je možný.



Obr. 17 Svetelná indikácia na konzole

Kotol v použitom zapojení neobsahuje žiadny senzor na meranie hladiny, ktorý by posielal priamo informáciu do PLC. Dokážeme to merať iba nepriamo cez ohrev a to tak, že neustále posielame nejaký malý výkon, ktorý sa prejaví až vtedy, ak sa vypne dióda nízkej hladiny v kotle. V našom algoritme sme to ošetrili podmienkou, ak $P_M_int \leq 45$ a $P_S_int > 300$ (Vid'. Obr. 14 a 15), tak sa výkon ešte neprejavil a premenná lowlevel je pravda, inak nepravda. Ak zmeriame, väčšie číslo pre výkon ako 45, tak máme istotu, že sme dosiahli minimálnu hladinu vody v kotle, lebo dodávame malý výkon a aktivuje sa odchodová podmienka. V ďalšom stave je nastavený časovač na zvýšenie objemu ohrevného média, aby neklesla po cirkulovaní výmenníkom tepla pod kritickú hodnotu.

Výstupná premenná časovača je závislá od vstupnej premennej, ktorá sa aktivuje po dosiahnutí minimálnej hladiny. Po uplynutí 14 s sa aktivuje premenná výstupu, ktorá je odchodovou podmienkou do ďalšieho stavu, kde sme dosiahli pracovnú hladinu. V tomto stave vypneme napúšťanie vody do kotla. Po naplnení kotla musí užívateľ hadičku vybrať a premiestniť ju do odtoku, lebo tou istou hadičkou prúdi chladiaca voda z chladiacej časti výmenníka tepla počas riadnej prevádzky. Keby sa z kotla nevybrala, spôsobila by poruchu a z kotla by voda pretiekla.

Aktivuje sa tretí veľký stav v nábehu na zahriatie ohrevného média a deaktivujeme časovač, predošli stav a celý superstav pre napúšťanie kotla. Stav ohrevu má 2 vnorené stavy. V jeho počiatočnom stave sa dodáva maximálny výkon do kotla a zohrieva sa voda, kým teplota

v kotle nedosiahne hodnotu 69 °C. Po dosiahnutí požadovanej teploty sa tento stav vypne a prepne sa do stavu, kde sa nedodáva žiadny výkon, ktorého aktivácia je odchodovou podmienkou z nábehu do stavu normálnej prevádzky.

Normálna prevádzka má viac paralelných stavov. Prvý z nich je logické riadenie nádrže so surovinou, ktorá sa napúšťa, ak horný limitný senzor nie je zopnutý a naopak. Druhý paralelný stav je riadenie teploty v kotle T_2 na hodnotu 69°C pomocou PI regulátora. Tretí z nich je riadenie teploty na konci pasterizačnej slučky T_1 pomocou PI regulátora čerpadlom ohrevného média, ktorého riadenie je úzko spojené s teplotou T_2 v kotle. Štvrtý stav je riadenie chladenia v ľavej časti výmenníka tepla, kde je podmienka: ak teplota T_3 je menšia ako 4 °C, tak púšťaj chladiace médium, inak ho vypni. Chladíme vodou z vodovodu a za týchto podmienok chladenie funguje neustále, keďže nikdy nedosiahneme teplotu pasterizácie v chladiacej časti, tak ho nemá zmysel vypínať. Ďalším stavom je riadenie produktu, kde je podmienka, ak T_1 je väčšia ako 50 °C, tak pasterizované médium pusti do zbernej nádrže suroviny, inak ho vráť do nádrže so surovinou, keďže sme to ešte nezohriali dostatočne. Ďalším stavom je výber zdroja, kde je naprogramované, že čerpáme z nádrže B ľavou pumpou pasterizačnej linky, ktorá funguje na konštantné otáčky 40% maximálneho výkonu.

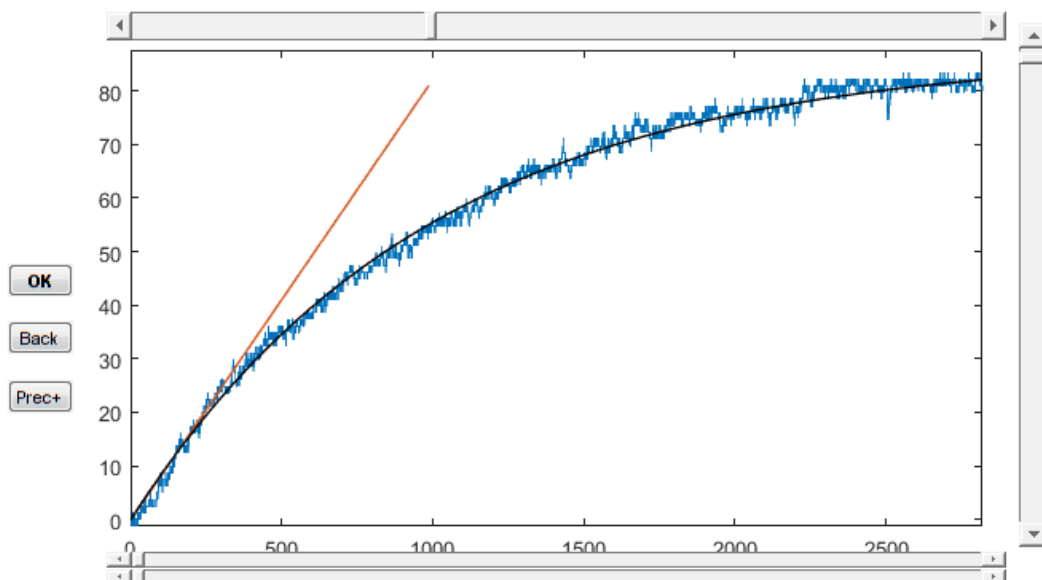
Celý proces sa zastaví, ak sa v zbernej nádrži produktu dosiahne hodnota 200 mm alebo užívateľ stlačí červené tlačidlo, napríklad v dôsledku nejakej poruchy alebo sa v kotle zvýši teplota nad 77 °C.

Identifikácia

Skokové zmeny musia byť vykonané pri nulových začiatkových podmienkach, teda systém musí byť v ustálenom stave. [5, str. 51] V pracovnej oblasti systému sme manuálne hľadali také parametre, kde sa teplota v kotle ustáli približne na hodnote 69 °C, čerpadlo išlo na 90% otáčok a špirála dodávala 0.43 kW tepla. Toto trvalo manuálne najšť 3-4h, čo navrhnuté riadenie zabezpečí za menej ako 9 minút aj s celým procesom ohrevu kotla.

Identifikácia kotla

Pri identifikácii kotla boli otáčky čerpadla manuálne nastavené na 90% maximálneho výkonu a počkali sme, kým sa pri dodanom výkone 0.37 kW systém ustáli, následne sa urobila skoková zmena na 0.43 kW, ktorá je znázornená na nasledujúcom obrázku.



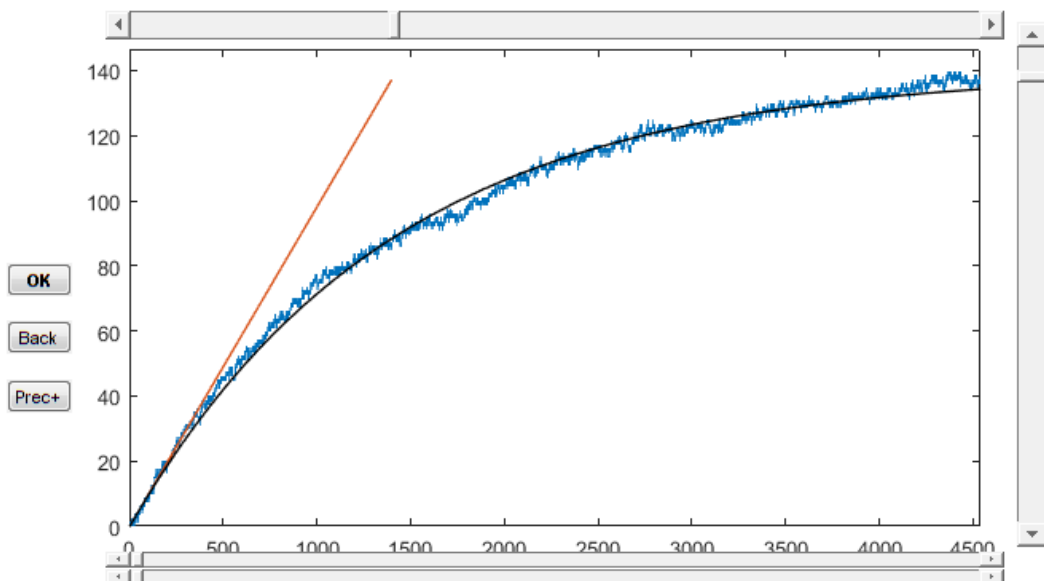
Obr. 18 Identifikácia prvej skokovej zmeny pre kotol

Obr. 19 Parametre prechodovej funkcie prvej skokovej zmeny

Prenosová funkcia z parametrov na Obr. 19 pre skokovú zmenu z 0.37 kw na 0.43 kw má tvar:

$$G_{1,k}(s) = \frac{87.0405}{985.3107s+1} e^{-0.9173s} \quad (\text{R. 5})$$

Ďalšia vykonaná skoková zmena bola zo 0.43 kW na 0.49 kW, ktorá je znázornená na nasledujúcom obrázku.



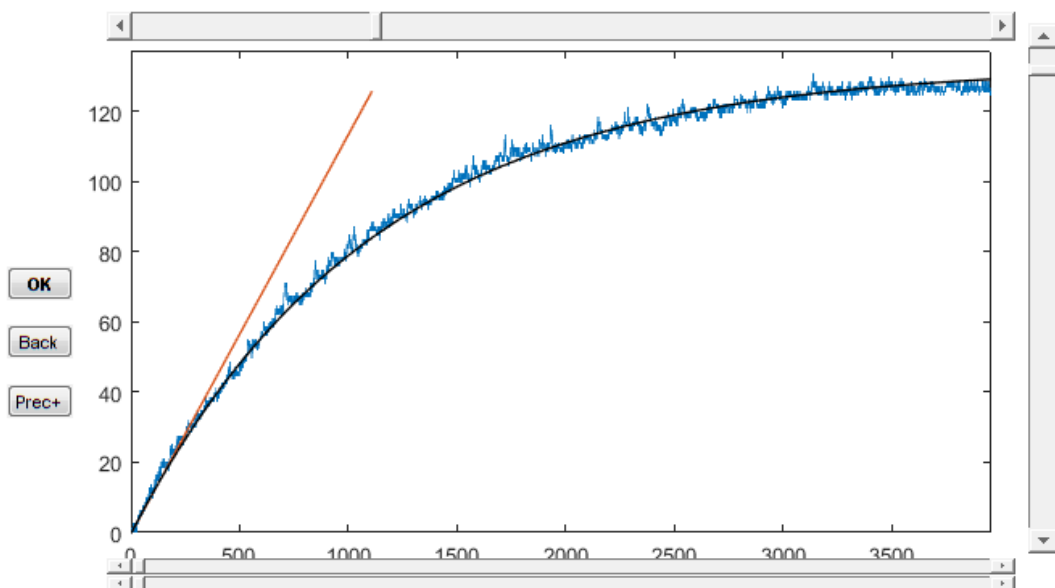
Obr. 20 Identifikácia druhej skokovej zmeny pre kotol

Obr. 21 Parametre prechodovej funkcie druhej skokovej zmeny

Prenosová funkcia z parametrov na Obr. 21 pre skokovú zmenu z 0.43 kw na 0.49 kw má tvar:

$$G_{2,k}(s) = \frac{139.7213}{1396.5576s + 1} e^{-0.98135s} \quad (\text{R. 6})$$

Ďalšia vykonaná skoková zmena bola zo 0.49 kW na 0.43 kW, ktorá je na Obr. 22.



Obr. 22 Identifikácia tretej skokovej zmeny pre kotol

Obr. 23 Parametre prechodovej funkcie tretej skokovej zmeny

Prenosová funkcia z parametrov na Obr. 23 pre skokovú zmenu z 0.49 kw na 0.43 kw má tvar:

$$G_{3,k}(s) = \frac{133.0211}{1106.6773s+1} e^{-1.9452s} \quad (\text{R. 7})$$

Nominálna prechodová funkcia pre kotol pri konštantnom výkone čerpadla sa určila ako priemerná hodnota parametrov z predošlých identifikácií a je v tvare:

$$G_{n,k}(s) = \frac{119.9276}{1162.8s+1} e^{-1.2813s} \quad (\text{R. 8})$$

Pre dané parametre sme skúšali rôzne regulátory navrhnuté toolboxom MATLABu PIDDESIGN. V nasledujúcej tabuľke sú zhrnuté jednotlivé parametre regulátorov.

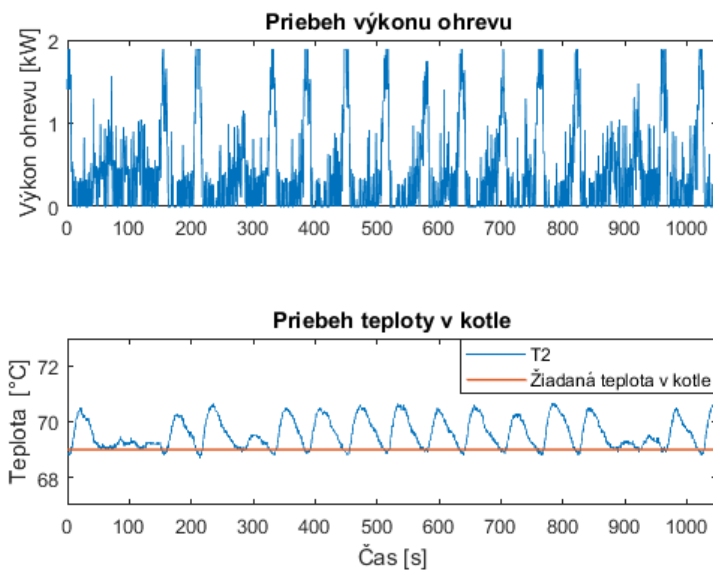
Tab. 2 Parametre navrhnutých regulátorov kotla

Regulátor	Metóda	Z_R	T_i	Priebeh
PI	Cohenova – Coonova	6.8112	4.261	Obr. 24
PI	Chienova-Hronesova-Reswickova (0% preregulovanie)	2.6485	1360.476	Obr. 25
P	Zieglerova - Nicholsova	7.5672	-	Obr. 26
P	Chienova-Hronesova-Reswickova (0% preregulovanie)	2.2702	-	Obr. 27
P	Chienova-Hronesova-Reswickova (0% preregulovanie)	5.297	-	Obr. 28

Informácie o Zieglerovej – Nicholsovej metóde si môžeme prečítať tu [9, str. 151], o Chienovej – Hronesovej – Reswickovej metóde tu [10] a o Cohenovej - Coonovej metóde tu [11, str. 141-145].

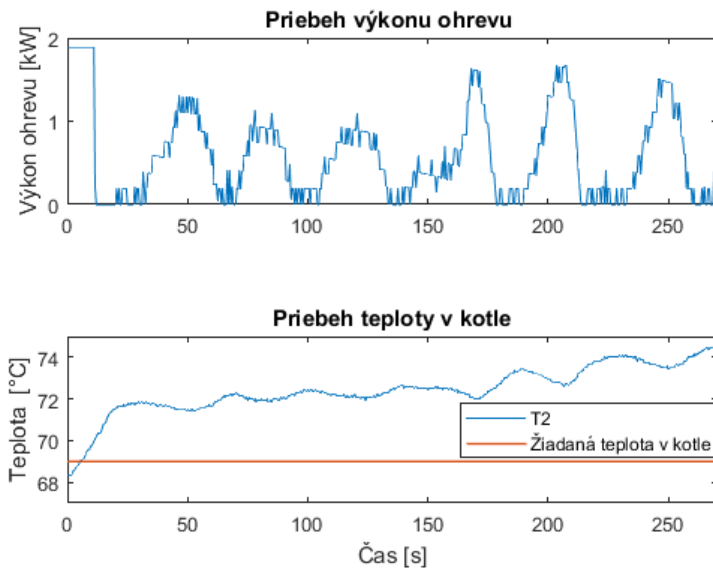
Ako vidno z Obr. 24 - 28, odskúšané regulátory nefungovali vhodne, PI regulátor navrhnutý Chienovou – Hronesovou – Reswickovou metódou s 0%-ným preregulovaním neustále zvyšoval teplotu T_2 . Riadenie zvyšnými regulátormi tiež nebol stabilný, priebeh riadenej veličiny, čiže teploty veľmi kmital, lebo ani akčný zásah riadiacej veličiny, čiže dodaného výkonu nebol konštantný. Rozhodli sme sa pre hľadanie vlastných parametrov.

PI - Cohanova - Coonova metóda



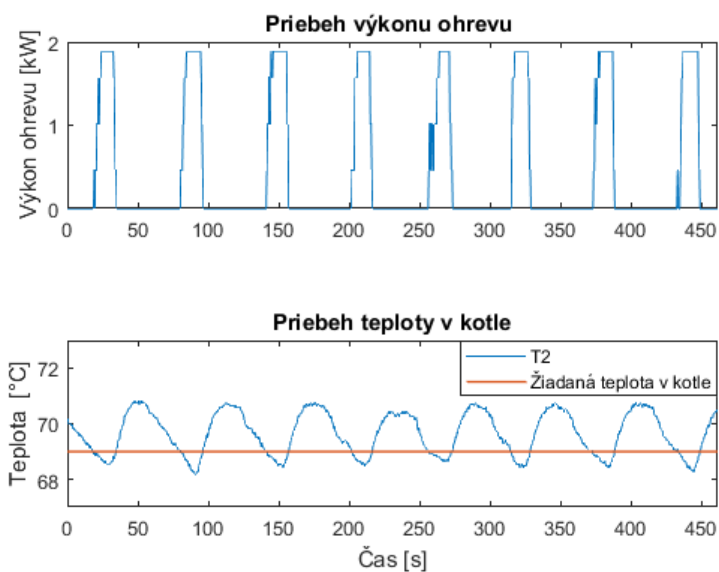
Obr. 24 Riadenie teploty v kotle PI regulátorom navrhnutý Cohenovou - Coonovou metódou

PI - Chienova-Hronesova-Reswickova metóda (0% preregulovanie)



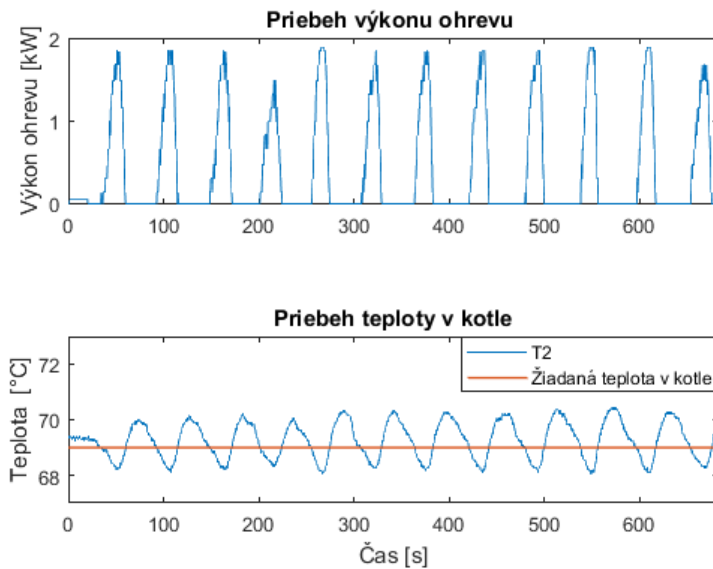
Obr. 25 Riadenie teploty v kotle PI regulátorom navrhnutý Chienovou – Hronesovou – Reswickovou metódou s 0%-ným preregulovaním

P - Zieglerova Nicholsonsova metóda



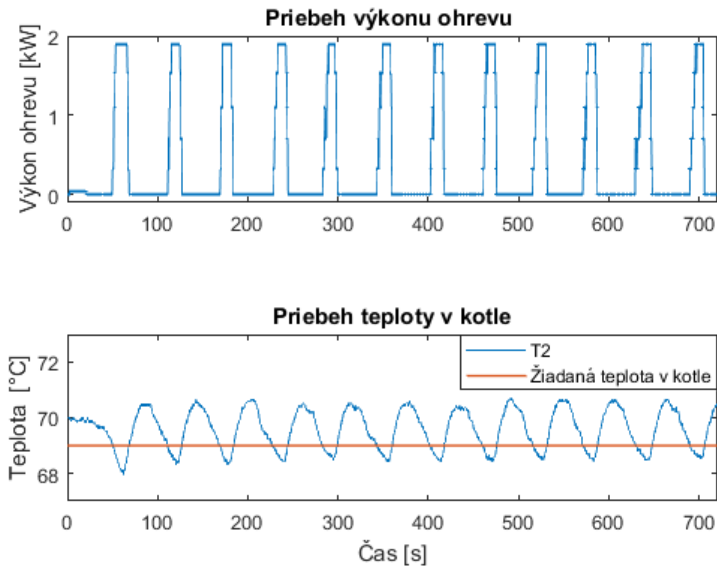
Obr. 26 Riadenie teploty v kotle P regulátorom navrhnutý Zieglerovou Nicholsonovou metódou

P - Chienova-Hronesova-Reswickova metóda (0% preregulovanie)



Obr. 27 Riadenie teploty v kotle P regulátorom navrhnutý Chienovou – Hronesovou – Reswickovou metódou s 0%-ným preregulovaním

P - Chienova-Hronesova-Reswickova metóda (20% preregulovanie)



Obr. 28 Riadenie teploty v kotle P regulátorom navrhnutý Chienovou – Hronesovou – Reswickovou metódou s 20%-ným preregulovaním

Proporcionálny regulátor je taký, že na veľkú regulačnú odchýlku odpovedá veľkým akčným zásahom, na malú regulačnú odchýlku odpovedá malým akčným zásahom. Proporcionalitu vyjadruje matematická funkcia:

$$u(t) = Z_R e(t) \quad [9, \text{str. 118}] \quad (\text{R. 9})$$

V našom algoritme sme to riešili tak, že sme zadefinovali žiadanú hodnotu teploty v kotle (SP), zadefinovali sme vzťah pre regulačnú odchýlku e , následne sme začali znižovať zosilnenie, kým sme nedosiahli stabilný akčný zásah. Teplota v kotle pri konštantnom odbere tepla závisí od výkonu ohrevu, takže sme P regulátor v softvéri zadefinovali v nasledujúcom tvare:

```
SP = 69.0  
Kp = 0.35  
e = SP-T2_real  
P_S_real=Kp*e
```

Tento regulátor fungoval tak, že v každej perióde vzorkovania sa odčítala aktuálna teplota v kotle, porovnala sa s požadovanou hodnotou, dostali sme regulačnú odchýlku, následne sa vynásobila so zosilnením, čo bolo našim akčným zásahom.

Keďže bola hodnota zosilnenia 2.2706 ešte stále silná, čo sa prejavilo kmitavým priebehom riadenia teploty, čo vidno na Obr. č. 26, tak sme skúsili P regulátor so zosilnením 1.5, čoho riadenie vidno na Obr. č. 29.

Aj tento priebeh riadenia bol ešte kmitavý, ďalšími znižovaniami zosilnenia sme dospeli k hodnote $K_p=0.35$. Výsledok tohto riadenia je znázornený na Obr. 30. Žiadaná teplota bola 69 °C, ale keďže je to P regulátor, má nejakú trvalú regulačnú odchýlku, zosilnením 0.35 sme dosiahli teplotu v kotle iba 67.8 °C.

Pre odstránenie trvalej regulačnej odchýlky treba zaviesť integračný člen, čo bude akčný zásah dovtedy meniť, kým sa nebude trvalá regulačná odchýlka rovnať nule. [9, str. 119]

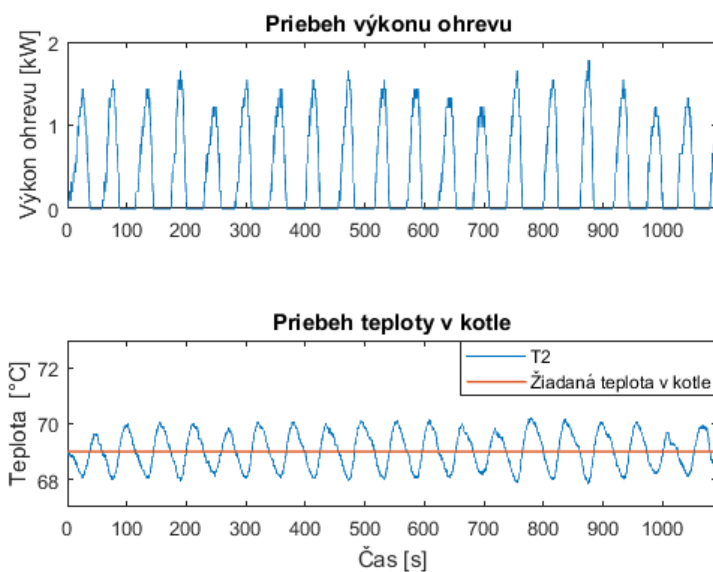
V našom algoritme sme to naprogramovali v takejto forme [12]:

```
SP = 69.0
Kp = 0.35
Ti = 800
T vz = 0.1
e = SP-T2_real
P_S_real = P_S_real+Kp*(e-p_e)+Kp/Ti*e* T vz
p_e = e
```

SP je žiadaná hodnota, K_p je zosilnenie, T_i je integračná časová konštanta, p_e je odchýlka v predošlom vzorkovaní, T_{vz} je náhrada infinitezimálnej časovej zmeny, ktorá je v našom prípade periódou vzorkovania, e je regulačná odchýlka nameranej hodnoty od žiadanej hodnoty. P_S_real je posielaný výkon do kotla, ktorý sa rovná nejakej počiatkovej hodnote dodaného výkonu, ďalší člen je proporcionálny člen ako zosilnenie vynásobené odchýlkou predošlej a aktuálnej regulačnej odchýlky a ďalší člen je integračný člen, ktorý je náhradou integračnej zložky zo vzťahu:

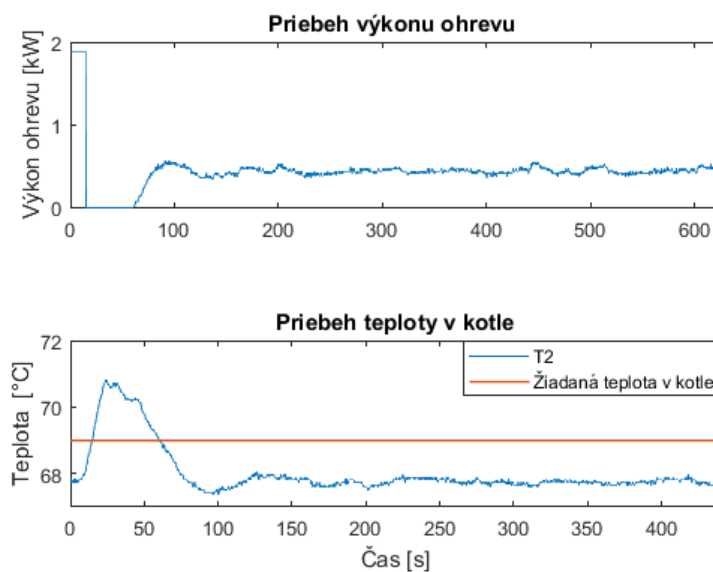
$$u(t) = \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt \quad [9, \text{str. 120}] \quad (R. 10)$$

P - Zosilnenie = 1.5



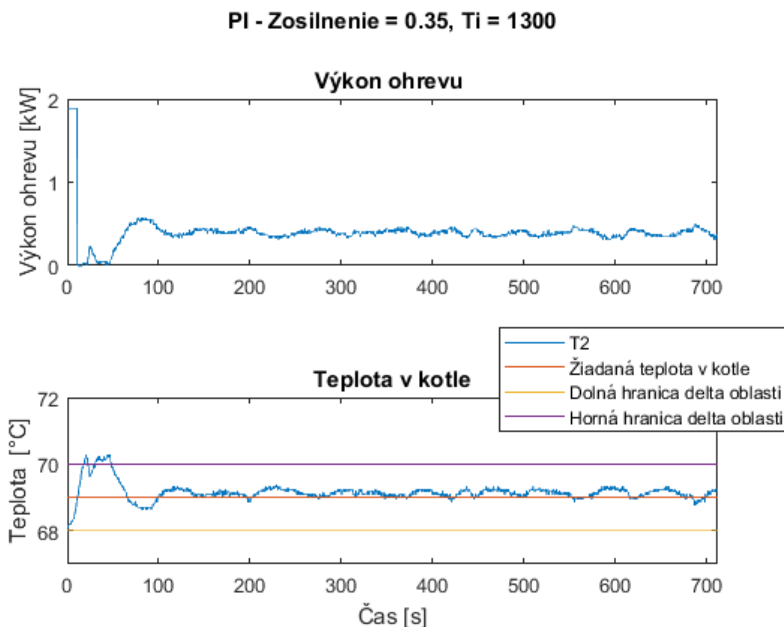
Obr. 29 Riadenie teploty v kotle P regulátorom so zosilnením 1.5

P - Zosilnenie = 0.35



Obr. 30 Riadenie teploty v kotle P regulátorom so zosilnením 0.35

Odchýlku od žiadanej hodnoty sme odstránili hľadaním vhodnej integračnej časovej konštanty, ktorú sme si zvolili 1300 po odskúšaní viacerých číselných hodnôt. Takýto priebeh riadenia teploty T_2 bol síce kmitavý, ale kmital v rámci delta oblasti žiadanej hodnoty, ktorá bola od 68 °C po 70°C.



Obr. 31 Riadenie teploty v kotle PI regulátorom so zosilnením 0.35 a integračnou časovou konštantou 1300

Identifikácia čerpadla

Po spojazdnení PI regulátora v kotle sme dosiahli približne konštantnú hodnotu teploty T_2 , ktorá ovplyvňuje teplotu T_1 , takže sme mohli vykonať skokové zmeny čerpadla. Urobili sme 4 skokové zmeny, z 90% na 100%, zo 100% na 80%, z 80% na 85% a z 85% na 65%. Identifikácia čerpadla prebehla analogicky ako identifikácia kotla. Identifikovali sme to ako systém prvého rádu, aj keď mal priebeh inflexný bod. Zväčšením dopravného oneskorenia prenosová funkcia dobre fitovala namerané údaje a zároveň sme získali najjednoduchší prenos pre návrh regulátora.

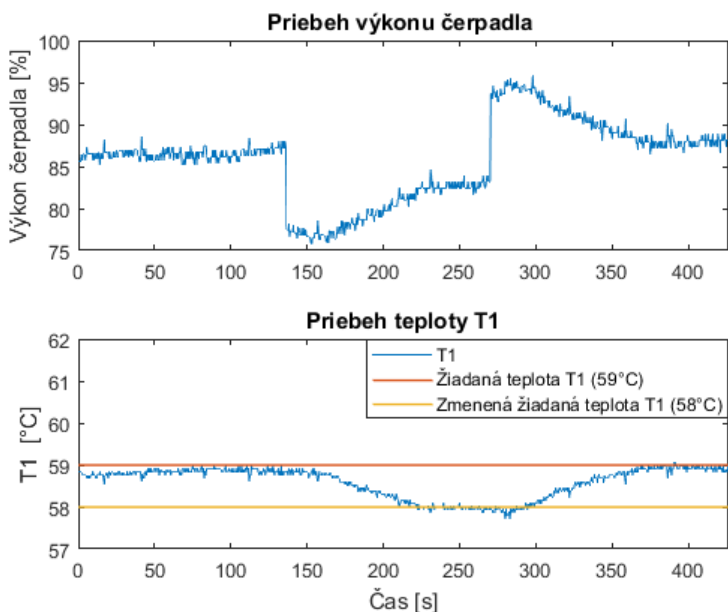
Nominálna prechodová funkcia pre čerpadlo pri konštantnej teplote v kotle sa určila ako priemerná hodnota parametrov 4 identifikácií a je v tvare:

$$G_{n,p}(s) = \frac{0.1453}{118.8905s+1} e^{-29.2404s} \quad (\text{R. 11})$$

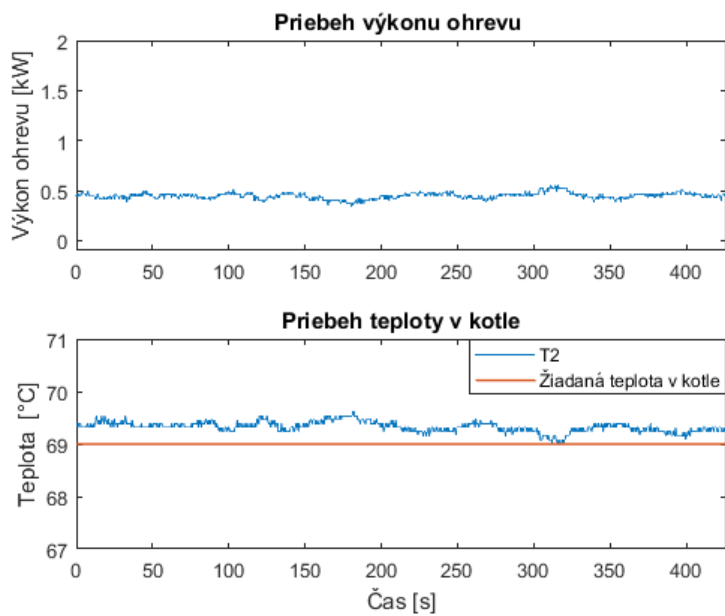
Pre dané parametre sme skúšali rôzne regulátory navrhnuté toolboxom MATLABu PIDDESIGN a ako najvhodnejší bol PI regulátor navrhnutý Chienovou – Hronesovou – Reswickovou metódou s 0%-ným preregulovaním a jeho prenos má tvar:

$$G_{R,p}(s) = \frac{9.7941}{139.1019s+1} \quad (\text{R. 12})$$

Regulátory, ktoré sa rýchlo ustálili sme testovali tak, že počas priebehu sme zmenili žiadanú hodnotu a čakali, kým sa znova ustáli. Pri tom sme sledovali reakciu riadenej (T_1) a riadiacej veličiny (otáčky čerpadla). Otáčky čerpadla a teplota T_1 úzko súvisí s teplotou T_2 a ohrevom, preto sme sledovali aj priebeh teploty a dodaného výkonu do kotla. Žiadaná teplota T_1 je 59°C a v čase 303 s sme to zmenili na 58°C , po ustálení v čase 613 s sme ho vrátili naspäť na pôvodnú hodnotu. Priebeh riadených a riadiacich veličín je na Obr. 32 a 33.



Obr. 32 Testovanie PI regulátora čerpadla navrhnutý Chienovou – Hronesovou – Reswickovou metódou s 0%-ným preregulovaním



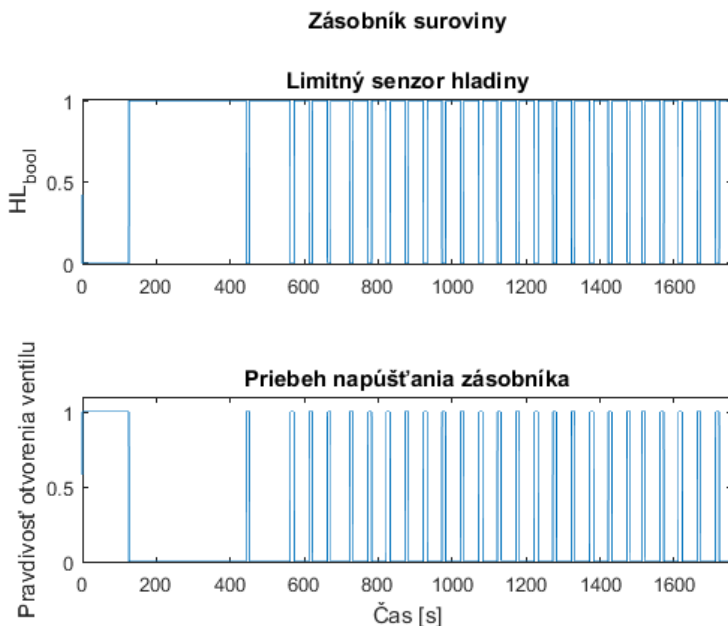
Obr. 33 Riadenie teploty v kotle pri zmene žiadanej hodnoty T_1

4 Výsledky práce a diskusia

V tejto kapitole bude vysvetlené podľa grafického znázornenia riadenie pasterizačnej linky počas nábehu, aj počas riadnej prevádzky. Zdrojový kód algoritmu je v Prílohe A.

Riadenie zásobníka B

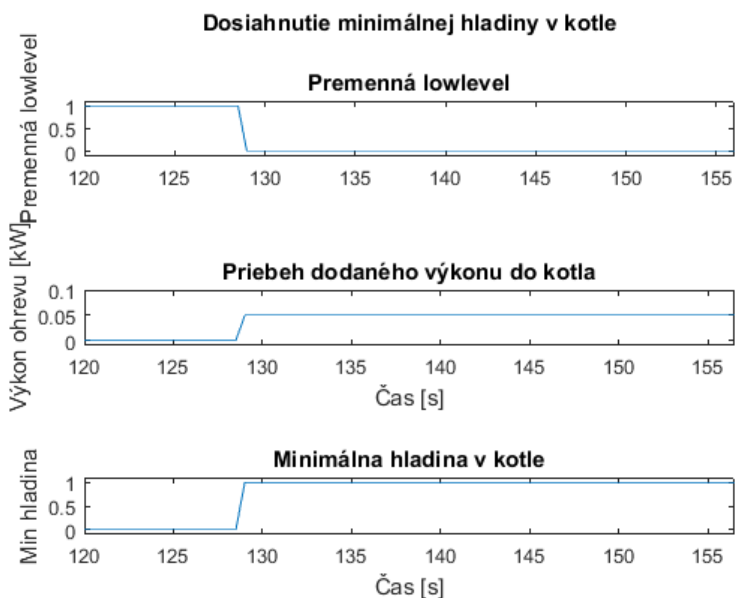
Stlačením zeleného tlačidla, pripojeného k PLC sa spustí logické riadenie zásobníka suroviny. Plní sa napúšťacím ventilom, kým sa nezopne horný limitný senzor hladiny HL. Po prvom zopnutí senzora sériovo nasleduje napúšťanie kotla a zohreje sa ohrevné médium na 69°C, zo zásobníka sa nečerpá, preto je dlho nečinné napúšťanie zásobníka. Po dosiahnutí požadovanej teploty ohrevného média sa spustia obe peristaltické čerpadlá a začne sa čerpať surovina cez výmenník. Zo začiatku ešte nedosahuje na konci pridržovacej trubice surovina 50 °C (T_1 kritické), tak sa vracia naspäť do zásobníka suroviny, preto je HL zopnuté aj v ďalšej fáze pomerne dlho. V nasledujúcej časti prevádzky, keď sa už dostane hodnota z teplomeru T_1 nad hodnotu 50°C, pasterizovaný produkt čerpáme do zbernej nádrže produktu a znižuje sa hladina v zásobníku. Keď je HL v nezopnutom stave, znova sa začne napúšťať zásobník surovinou, kým sa zopne. Toto sa opakuje cyklicky počas celej ďalšej prevádzky.



Obr. 34 Riadenie výšky hladiny v zásobníku senzorom HL

Napúšťanie kotla vodou

Kotol sa smie napúšťať po vložení hadičky, čo užívateľ potvrdí stlačením zeleného tlačidla. Kotol v danom zapojení neobsahuje žiadny senzor na priame meranie hladiny, ale má dodávateľom zabudovaný bezpečnostný senzor. Kým sa nedosiahne minimálna hodnota v kotle, nemôžeme dodávať do systému teplo, aby sa nedal naprázdno spustiť ohrev. Preto počas napúšťania kotla softvérovo dodávame teplo 0.05 kW, čo sa neprejaví v zariadení, kým sa neodosiahne bezpečná minimálna hladina v kotle. Dovtedy je meraný výkon (integer) určite menší ako 45 a posielaný výkon (integer) je určite väčší ako 300, v tomto prípade je premenná lowlevel pravdivá a minimálnu hladinu sme ešte nedosiahli, lebo sa dosiahne, ak je premenná lowlevel nepravdivá. Ak sa dosiahne priamo nemerateľná minimálna hladina, teda môžeme dodávať teplo, tak meraný výkon (integer) bude väčší ako 45, teda premenná lowlevel bude nepravdivá a aktivuje sa stav minimálna hladina (Obr. 35), následne sa spustí časovač a kotol sa plní ďalších 14 s vodou.

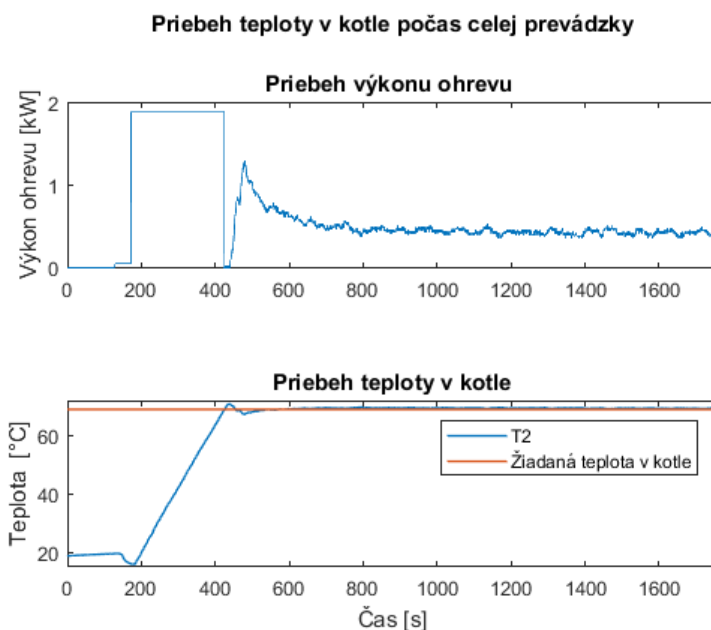


Obr. 35 Dosiahnutie minimálnej hladiny v kotle

Riadenie ohrevu

Následne sa začne ohrievať voda v kotle, dodáva sa maximálny možný výkon, kým sa nedosiahne teplota 69°C. Medzitým musí užívateľ hadicu z kotla vybrať a vložiť do odtoku.

Po dosiahnutí žiadanej teploty sa jednak zapne PI regulátor kotla, jednak sa ohrevné médium ešte aj ďalej zohrieva v dôsledku zotrvačnosti. Tento prekmít vidno na Obr. 36 a 37, čo však je žiadané, keďže sa hneď spustí čerpadlo ohrevného média na plný výkon. Začneme odoberať veľké množstvo tepla z kotla, čo vytvorí podkmit, ktorý nasleduje po prekmíte na Obr. 36 a 37. Túto poruchu navrhnutý regulátor kotla odstránil a hodnotu T_2 dostal do delta oblasti žiadanej hodnoty, čím je rozsah 68 °C až 70 °C .

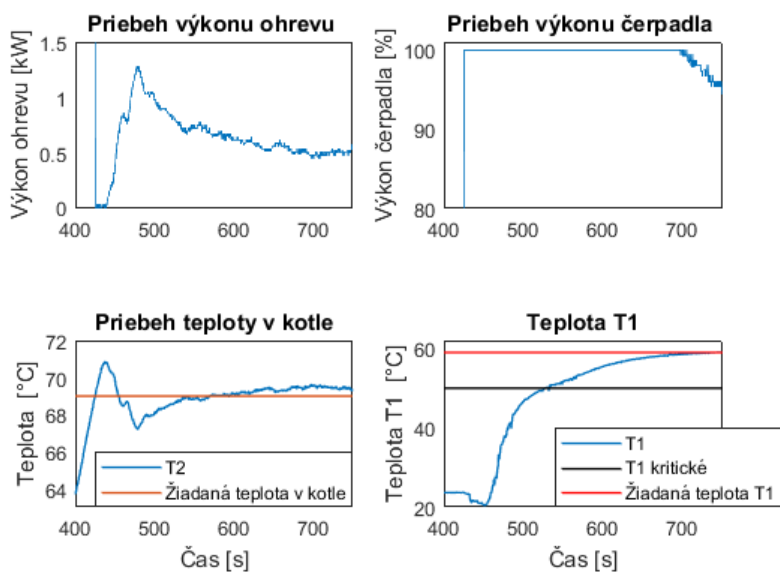


Obr. 36 Zohrievanie ohrevného média a riadenie teploty v kotle počas celej prevádzky

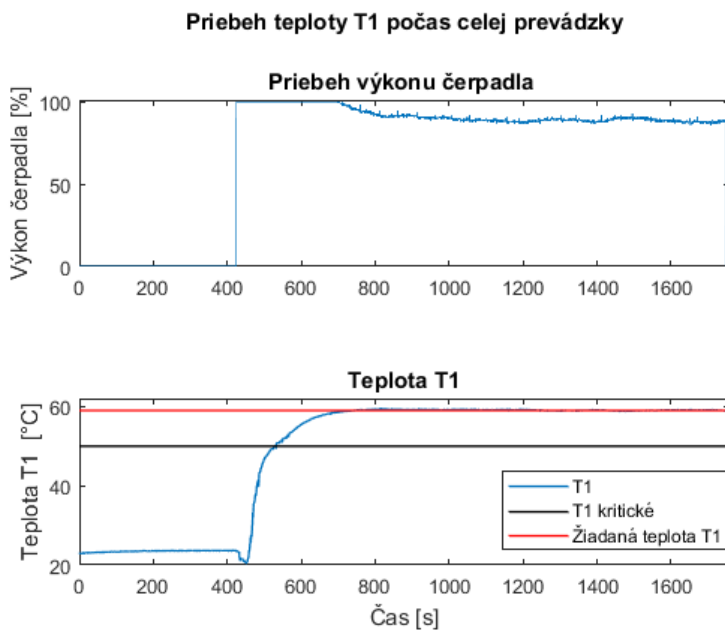
Riadenie teploty T_1 čerpadlom

Ak sa teplota T_1 dostane na hodnotu 58.5 °C, zapne sa PI regulátor čerpadla a dostane teplotu na konci udržiavacej trubice (T_1) na žiadanú hodnotu 59°C. Riadenie teploty T_1 čerpadlom vidno na Obr. 38 a 39.

Riadenie T2 a T1 počas riadnej prevádzky

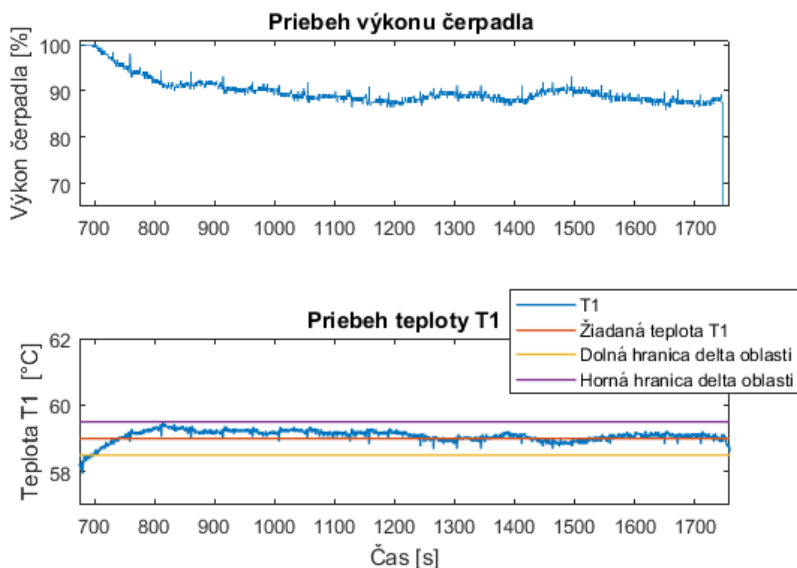


Obr. 37 Riadenie teploty T_2 v kotle a nábeh teploty T_1 na začiatku riadnej prevádzky



Obr. 38 Riadenie teploty T_2 v kotle a nábeh teploty T_1 počas riadnej prevádzky

Riadenie teploty T₁

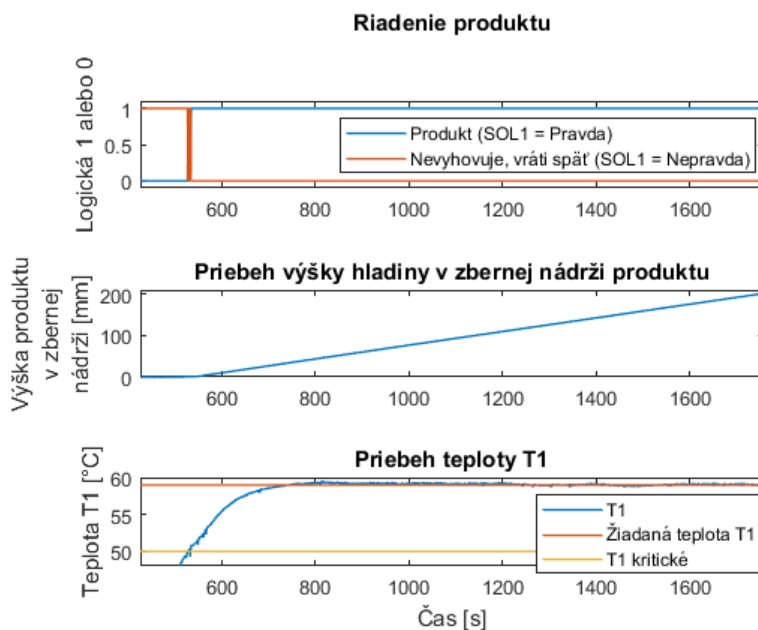


Obr. 39 Riadenie teploty T₁ PI regulátorom po dosiahnutí 58.5 °C

Riadenie produktu

Ak dosiahne T₁ hodnotu väčšiu ako 50°C, tak surovinu už nevraciamе naspäť do zásobníka, ale čerpáme ho do zbernej nádrže. Napriek tomu, že už nám vyhovuje teplota pasterizácie nad 50°C, optimálna pre navrhnuté regulátory je v intervale od 58.5 °C do 59.5 °C, čo zabezpečí PI regulátor čerpadla.

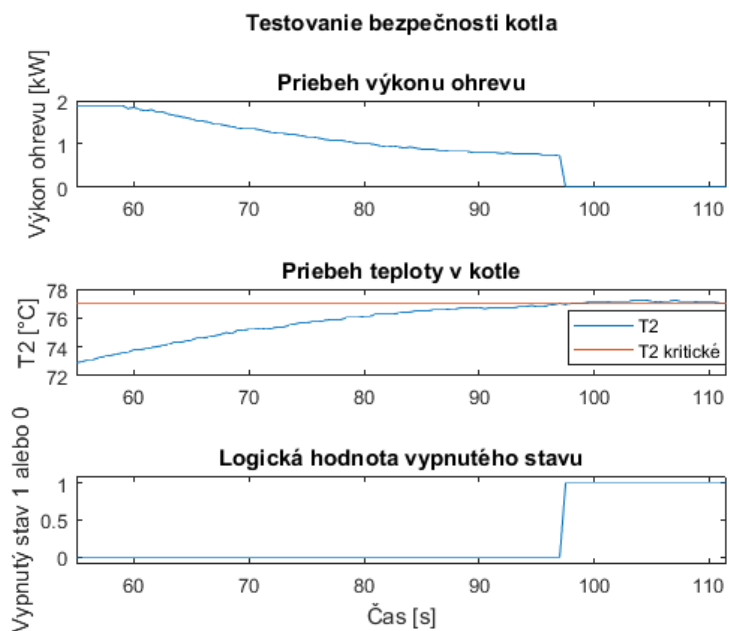
Ochladený produkt na výstupe výmenníka tepla dosiahol teplotu 15°C, lebo chladiaca voda nebola dostatočne studená. Produkt zbierame, kým výška produktu v nádrži nedosiahne 200 mm, následne sa celý program prepne do vypnutého stavu, čiže riadenie zásobníka suroviny sa vypne, vypnú sa obe čerpadlá aj s riadením teploty T₁ a vypne sa aj ohrev s riadením teploty T₂, prívod chladiacej vody a všetky pomocné premenné sa prepíšu do stavu, aby bolo zariadenie pripravené na ďalšie použitie. Priebeh zberu produktu je znázornený na Obr. 40. Celý výrobný cyklus trvá 29 min a 45 s aj s vložením hadice užívateľom do kotla a následným potvrdením zeleného tlačidla. Za tento čas sa vyprodukuje 3.69L pasterizovaného produktu.



Obr. 40 Riadenie produktu a výška jeho hladiny

Bezpečnosť kotla

Zaviedli sme bezpečnostný limit kotla. Ak teplota T_2 dosiahne 77°C , riadenie sa prepne do vypnutého stavu a jednotlivé akčné členy, tak isto ako po riadnom skončení prevádzky dostanú nepravdivú logickú hodnotu. Testovali sme to tak, že sme žiadanú hodnotu kotla, čo je vstupný parameter do jeho PI regulátora, zadali 79°C a keď dosiahla 77°C , všetko sa vyplo, znázornené je to na Obr. 41.



Obr. 41 Testovanie prehriatia kotla

5 Záver

V dnešnej dobe sa každá firma snaží zminimalizovať náklady a zvýšiť zisk kvalitnejšou výrobou, ktorú zabezpečí optimalizácia a automatizácia technologického procesu.

V tejto práci sme sa venovali automatizácii pasterizačnej linky, kde sa riešilo riadenie zásobníka suroviny, výmenníka tepla, kotla a peristaltického čerpadla. Navrhli sme aj riadenie produktu na rozhodovanie pasterizovanej suroviny, či sa má vrátiť do zásobníka alebo produkt dosiahol dostatočne vysokú teplotu a môže ísť do výmenníka tepla na chladenie. Odtiaľ sa čerpá do zbernej nádrže produktu. Navrhli sme aj jednoduché bezpečnostné prvky vo forme červeného tlačidla na zastavenie personálom a na vypnutie celého riadenia v dôsledku veľkého zvýšenia teploty v kotle.

Jeden cyklus prevádzky s navrhnutým riadením trvá 29 minút a 45 sekúnd. Vyprodukuje sa pasterizovaná surovina vo výške 200 mm v zbernej nádrži, čo je 3.68 L produktu.

Zoznam použitej literatúry

[1] <https://science.howstuffworks.com/life/cellular-microscopic/pasteurization.htm>

[2] <http://homen.vsb.cz/hgf/546/Lucie%20Kucerova/Bakalarska%20prace%20Lucie%20Kucero%20va/bakterie.html>

[3] <https://www.deliciousobsessions.com/2010/10/types-pasteurization/>

[4] <https://www.ipec-inc.com/products/htst/>

[5] <https://www.amci.com/industrial-automation-resources/plc-automation-tutorials/what-plc/>

[6] <https://www.foodmanufacture.co.uk/Article/2015/05/05/UK-food-industry-turns-on-to-automation>

[7] <http://www.ursalink.com/industrial-automation/>

[8] <https://fr.scribd.com/document/226726712/PCT-23-Mk-II-Manual-Issue-9>

[9] Monika Bakošová / Miroslav Fikar: Riadenie procesov, 2. opravené vydanie, tlač Nakladateľstvo STU v Bratislave, ISBN 978-80-227-3763-0

[10] Alexík, M. a kol.: Základy automatického riadenia, VŠDS, Žilina 1993, ISBN 8071001139, 9788071001133

[11] Jacques F. Smuts: Process Control for Practitioners, rok vydania: 2011, ISBN 978-0-9838438-1-8

[12] <https://www.scribd.com/doc/19070283/Discrete-PI-and-PID-Controller-Design-and-Analysis-for-Digital-Implementation>

Poznámka: Všetky uvedené webové adresy dňa 5.5.2018 boli funkčné

Prílohy

Príloha A

Automatická pasterizačná linka – Zdrojový kód algoritmu

```
PROGRAM _INIT
    start_pom = TRUE
    stop_pom = TRUE
    zapnute_pom = TRUE
    NapustimeKotol_pom = TRUE
    ZohrejemeKotolNaT_pom = TRUE
    Riadenie_kotla_pom = TRUE
    Vypnute = TRUE
    Zapnute=FALSE
    Nabeh=TRUE
    NormalnaPrevadzka=FALSE
    NapustimeZdroj_pom = TRUE
    TON_01.IN = FALSE
    L_real = 0.0
END_PROGRAM

PROGRAM _CYCLIC
    IF (Vypnute) THEN
        P_S_real=0.0
        SOL1=FALSE
        SOL2=FALSE
        SOL3=FALSE
        fillb=FALSE
        pumpW_real=0.0
        pumpF_real=0.0
        IF ( start AND start_pom ) THEN
            start_pom = FALSE
            stop_pom = TRUE
            Zapnute = TRUE
            Vypnute = FALSE
        ENDIF
    ENDIF
    IF (Zapnute) THEN
        IF ( zapnute_pom ) THEN
            Nabeh = TRUE
        ENDIF
    ENDIF
```

```

NormalnaPrevadzka=FALSE
zapnute_pom=FALSE
ENDIF
IF (stop AND stop_pom ) OR (overtemp) OR (NadrzA) THEN
    stop_pom = FALSE
    start_pom = TRUE
    Vypnute = TRUE
    Zapnute = FALSE
    TON_01.IN = FALSE
ENDIF
IF (Nabeh) THEN
    IF (NapustimeZdroj_pom) THEN
        NapustimeZdroj = TRUE
        NapustimeKotol = FALSE
        ZohrejemeKotolNaT = FALSE
        NapustimeZdroj_pom = FALSE
    ENDIF
    IF (NapustimeZdroj) THEN
        fillb = NOT(HL_bool)
        IF HL_bool THEN
            NapustimeKotol = TRUE
            NapustimeZdroj = FALSE
        ENDIF
    ENDIF
    IF (NapustimeKotol) THEN
        IF (NapustimeKotol_pom) THEN
            UzVlHadCoolDoKotla = TRUE
            NapustanieVody = FALSE
            MinHladinaDosiahnuta = FALSE
            PracovnaHladinaDosiahnuta = FALSE
            ZohrejemeKotolNaT = FALSE
            NapustimeKotol_pom = FALSE
        ENDIF
        IF (UzVlHadCoolDoKotla) THEN
            IF (start) THEN
                NapustanieVody = TRUE
                UzVlHadCoolDoKotla=FALSE
            ENDIF
        ENDIF
        IF (NapustanieVody) THEN
            SOL3 = TRUE
            P_S_real = 0.05
            IF NOT(lowlevel) THEN
                MinHladinaDosiahnuta = TRUE

```

```

        NapustanieVody = FALSE
        SOL3 = FALSE
    ENDIF
ENDIF
IF (MinHladinaDosiahnuta) THEN
    SOL3 = TRUE
    TON_01.IN    =    MinHladinaDosiahnuta    AND
NOT(lowlevel)

    TON_01.PT = T#14s
    TON_01 FUB TON()
    output = TON_01.Q
    elapsedTime = TON_01.ET
    IF ( output ) AND ( NOT(lowlevel) ) THEN
        PracovnaHladinaDosiahnuta = TRUE
        MinHladinaDosiahnuta = FALSE
        SOL3 = FALSE
        TON_01.IN = FALSE
    ENDIF
ENDIF
IF (PracovnaHladinaDosiahnuta) THEN
    SOL3 = FALSE
ENDIF
IF (PracovnaHladinaDosiahnuta) THEN
    ZohrejemeKotolNaT = TRUE
    NapustimeKotol = FALSE
ENDIF
ENDIF
IF (ZohrejemeKotolNaT) THEN
    IF (ZohrejemeKotolNaT_pom) THEN
        Hreje = TRUE
        Nehreje = FALSE
        ZohrejemeKotolNaT_pom = FALSE
    ENDIF
    IF (Hreje) THEN
        P_S_real = 1.89
        IF T2_real > 69.0 THEN
            Nehreje = TRUE
            Hreje = FALSE
        ENDIF
    ENDIF
    IF (Nehreje) THEN
        P_S_real = 0.0
        NormalnaPrevadzka = TRUE
        Nabeh = FALSE
    ENDIF

```

```

ENDIF
ENDIF
ENDIF
IF (NormalnaPrevadzka) THEN
    RiadenieKotla = TRUE

    IF (RiadenieKotla) THEN
        SP = 69.0
        Kp = 0.35
        Ti = 1300
        Tvz = 0.1
        e = SP-T2_real
        P_S_real = P_S_real+Kp*(e-p_e)+Kp/Ti*Tvz*e
        p_e = e

    ENDIF

    RiadenieOhrevu = TRUE
    IF (RiadenieOhrevu) THEN
        IF T1_real < 58.5 THEN
            pumpW_real = 100.0
        ELSE
            SPc=59.0
            Kpc=9.7941
            Tic=139.1019
            Tvz=0.1
            ec=SPc-T1_real
            pumpW_real=pumpW_real+Kpc*(ec-p_ec)+Kpc/Tic*Tvz*ec
            p_ec=ec
        ENDIF

    ENDIF

    RiadenieChladienia = TRUE
    IF (RiadenieChladienia) THEN
        IF T3_real > 4.0 THEN
            SOL3 = TRUE
        ELSE
            SOL3 = FALSE
        ENDIF

    ENDIF

    RiadenieProduktu = TRUE
    IF (RiadenieProduktu) THEN
        IF T1_real > 50.0 THEN
            SOL1 = TRUE
        ELSE

```

```

                                SOL1 = FALSE
                                ENDIF
                                ENDIF
                                VyberZdroja = TRUE
                                IF (VyberZdroja) THEN
                                    SOL2 = TRUE
                                    pumpF_real=40.0
                                ENDIF
                                ENDIF
                                ENDIF
                                END_PROGRAM

PROGRAM _EXIT
END_PROGRAM

```