

Vysoké učení technické v Brně
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Semestrální práce
MPC-AUP

Radim Říha, 221013

Petr Šopák, 221022

Brno, 2023

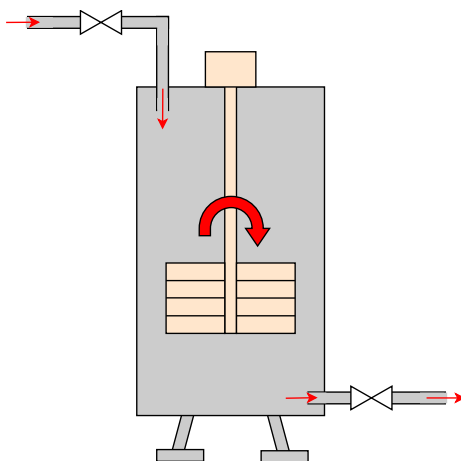
Zadání:

Technologický proces slouží k pasterizaci kapalin. Nerezová nádrž je vysoká 2000 mm a její objem je přesně 2 m^3 . Pro přívod materiálu je využito vstupní a pro odvod výstupní potrubí. Vstupní potrubí o průměru DN125 je konstantně tlakováno vstupním materiálem. Výstupní potrubí, rovněž o průměru DN125 je přivedeno do zásobníků, které uchovávají výstupní produkt pro další zpracování. Technologie je vybavena mechanismem pro míchání materiálu uvnitř tanku (mixérem), jehož statický krouticí moment v okamžiku kdy je tank zcela plný je 380 N/m a jehož maximální přípustná rychlost je 40 ot./min. Tento mechanismus je vybaven převodovkou s převodovým poměrem 38:1. Pro ohřev je k technologii připojen tepelný okruh z přidružené výroby (jaderné elektrárny) s plynule regulovatelným jmenovitým výkonem 25 MW. Maximální přípustná teplota veškerých mechanických částí je 95°C , po jejímž překročení dojde k nenávratným škodám a technologie bude zničena.

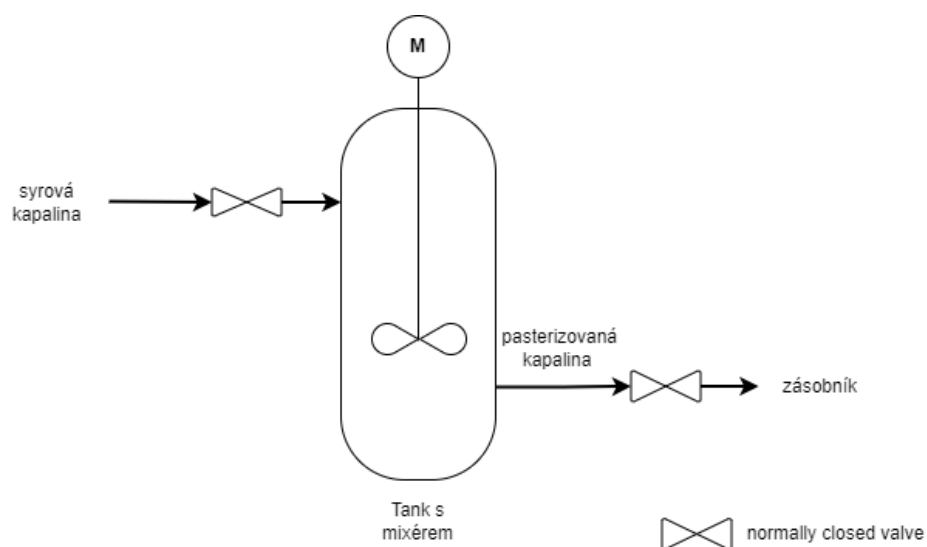
Požadavky:

1. Nerezová nádrž – výška 2000 mm a objem 2 m^3
2. Vstupní a výstupní potrubí – DN125
3. Vstupní potrubí je tlakováno konstantně
4. Mixér – statický krouticí moment 380 N/m, maximální přípustná rychlost 40 ot./min, převodovka 38:1
5. Ohřev – jmenovitý výkon 25 MW
6. Maximální přípustná teplota mechanických částí 95°C

Schéma:



Obr.1.: Zjednodušený proces pasterizační jednotky

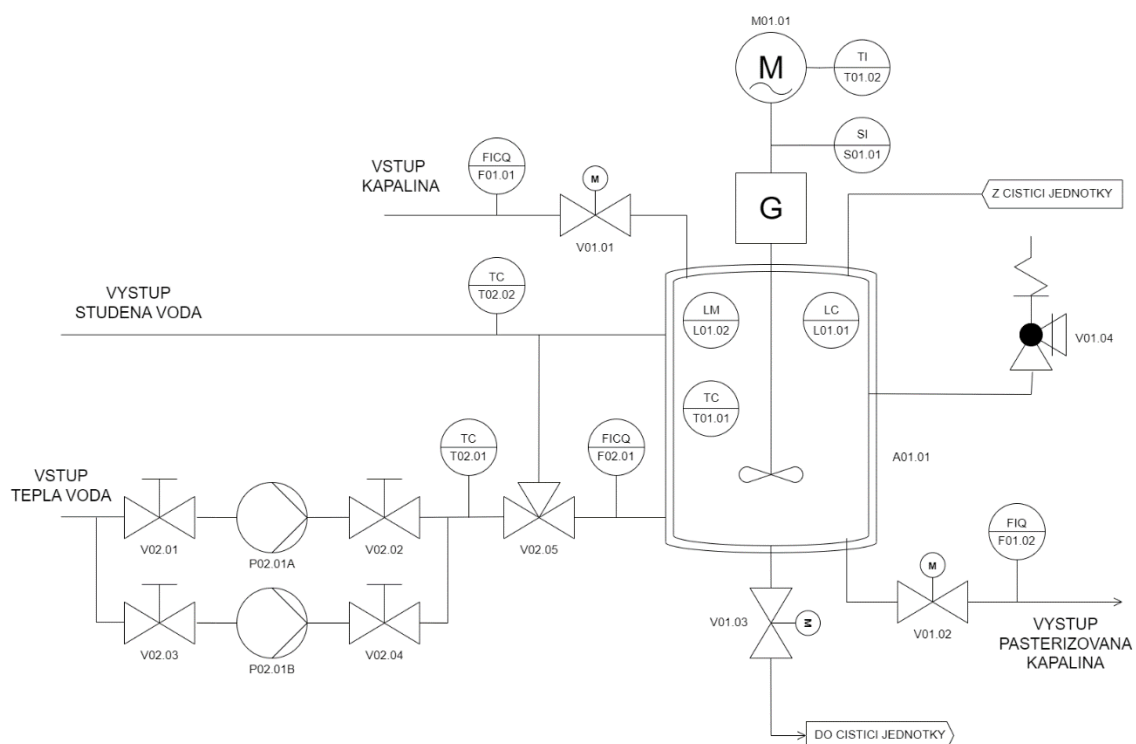


Obr.2.: Process flow diagram pasterizační jednotky

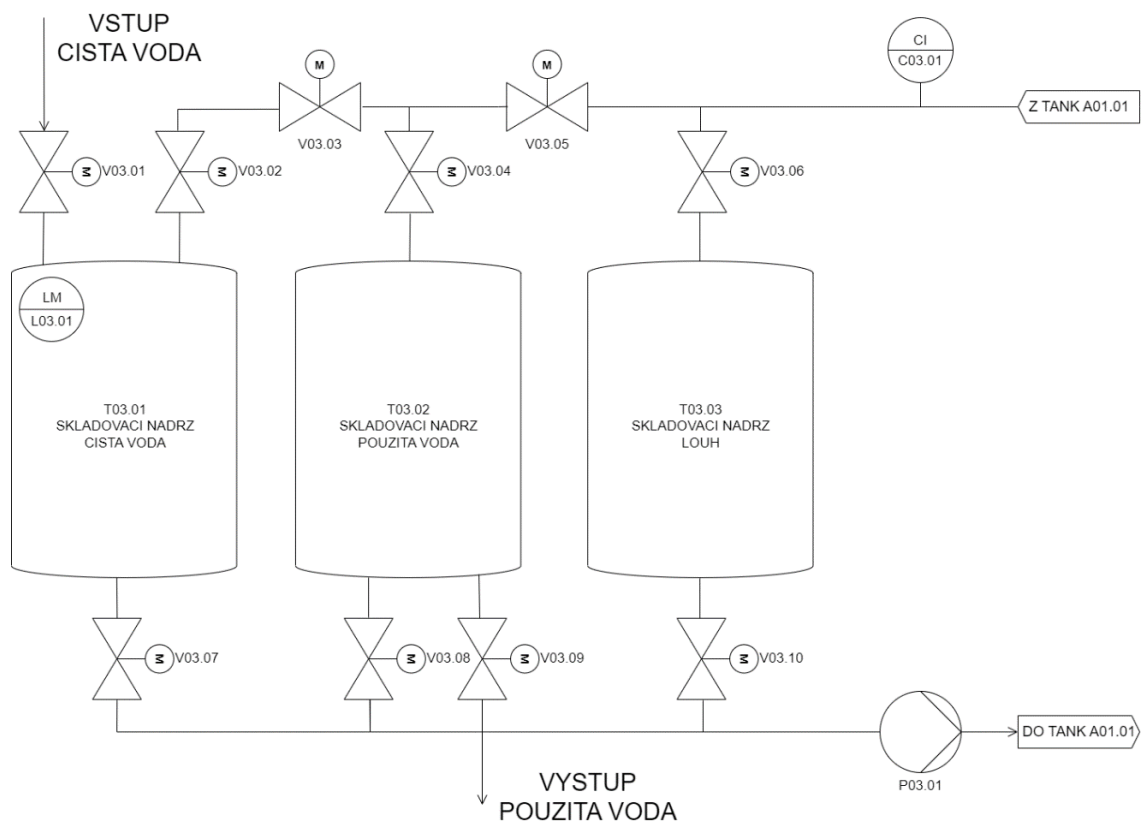
Hazardní stavy a jejich detekce:

stav	detekce stavu
trhlina v nádrži	snímač hladiny kapaliny v nádrži
porucha vstupního ventilu	průtokoměr vstupního potrubí
porucha výstupního ventilu	průtokoměr výstupního potrubí
porucha motoru	snímač otáček hřídele motoru
porucha převodovky nebo míchadla	snímač otáček hřídele motoru
přehřátí motoru	snímač teploty motoru
přehřátí nádrže	snímač teploty kapaliny v nádrži
porucha tepelného okruhu	snímač teploty tepelného okruhu

2. P&ID diagram:



Obr.3.: P&ID diagram procesní jednotek pro topení a manipulace se vstupní kapalinou



Obr.4.: P&ID diagram procesní jednotky pro čištění tanku vodou a louhem

Použité snímače:

označení	typ	účel
F01.01	FICQ	měření a regulace množství napuštěné kapaliny
F01.02	FIQ	měření množství vypuštěné kapaliny
S01.01	SI	detekce poruchy míchadla nebo převodovky
T01.01	TC	regulace teploty kapaliny v tanku
T01.02	TI	detekce přehřátí motoru
L01.01	LC	regulace výšky hladiny kapaliny v nádrži
L01.02	LM	detekce napuštění maximálního množství kapaliny
T02.01	TC	měření množství tepla předaného z tepelného okruhu do nádrže
T02.02	TC	měření množství tepla předaného z tepelného okruhu do nádrže
F02.01	FICQ	měření množství tepla předaného z tepelného okruhu do nádrže
L03.01	LM	detekce napuštění maximálního množství čisté vody
C03.01	CI	měření koncentrace louhu

Použité akční členy:

označení	popis
V01.01	vypouštěcí ventil kapaliny pro pasterizaci do tanku
V01.02	vypouštěcí ventil pasterizované kapaliny z tanku
V01.03	vypouštěcí ventil čistící kapaliny z tanku
V01.04	přetlakový ventil tanku
M01.01	motor míchadla
V02.01	vstupní ventil hlavního čerpadla tepelného okruhu
V02.02	výstupní ventil hlavního čerpadla tepelného okruhu
V02.03	vstupní ventil záložního čerpadla tepelného okruhu
V02.04	výstupní ventil záložního čerpadla tepelného okruhu
V02.05	rozdělovací ventil tepelného okruhu
P02.01A	hlavní čerpadlo tepelného okruhu
P02.01B	záložní čerpadlo tepelného okruhu
V03.01	vstupní ventil čisté vody
V03.02	napouštěcí ventil nádrže s čistou vodou
V03.03	oddělovací ventil nádrží
V03.04	napouštěcí ventil nádrže s použitou vodou
V03.05	oddělovací ventil nádrží
V03.06	napouštěcí ventil nádrže s louhem
V03.07	vypouštěcí ventil nádrže s čistou vodou
V03.08	vypouštěcí ventil nádrže s použitou vodou
V03.09	výstupní ventil použité vody
V03.10	vypouštěcí ventil nádrže s louhem
P03.01	čerpadlo nádrží

3. Instrumentace

a) Zvolené snímače:

	Označení	Rozsah	Citlivost	Rozlišení	Provozní podmínky	Chyba měření	Mechanické vlastnosti	Rozhraní	Data
1	F01.01	0...135 m ³ /h	0,07 V*h/m ³	-	-20...120 °C 1600 kPa	±2 %	příruba DN125	0,5...10 V	URL
2	F01.02								
3	T01.01	-50...150 °C	0,08 mA/°C	0,04 K	30 Mpa	±0.3 K	závit G1/2	4...20 mA	URL
4	T01.02	-40...300 °C	13,8 Ω/K	-	-	±6 K	v motoru	odpor	URL
5	S01.01	3...6000 ot./min	-	-	-20...80°C	-	závit M18	pulzní	URL
6	L01.01	0,15...2 m	8,65 mA/m	<1 mm	-30...70°C	±0,15 %	závit G1	4...20 mA	URL
7	L01.02	on/off	-	-	-40...100°C	-	závit G3/4	NPN/PNP	URL
8	F02.01	0...21 m ³ /h	0,45 V*h/m ³	-	-20...120 °C 1600 kPa	±2 %	závit DN50	0,5...10 V	URL
9	T02.01	-30...130 °C	0,39 Ω/°C	-	5...95 % r. v.	±1 K	příložné čidlo	odporový výstup	URL
10	T02.02								

Snímače F01.01; F01.02: Rozsah snímače je 0 – 135 m³/h. Provozní podmínky až do 120°C. Pro potrubí o průměru DN125. Analogový napěťový výstup v rozsahu 0,5 až 10 V.

Snímač T01.01: Rozsah měřené teploty v rozmezí -50 až 150 °C. Vyrobeno z nerezové oceli a ochrana IP 67. Má proudové rozhraní (4 až 20 mA).

Snímač S01.01: Snímač otáček v rozsahu 3 až 6000 ot./min, což splňuje maximální otáček motoru dle zadání. Provozní teplota může být menší. Je mimo pasterizační tank.

Snímač L01.01: Hladinoměr s proudovým výstupem anebo linkou RS-485 s Modbus RTU. Vhodný pro teploty až 100 °C.

Snímač L01.02: Binární hladinoměr s maximální provozní teplotou až 100 °C.

Snímač F02.01: Tento snímač je řiditelný a dostáváme z něho analogový výstup v rozsahu 0,5-10 V. Splňuje provozní podmínky – maximální provozní podmínka pro tento snímač je 120 °C. Pro potrubí o průměru DN50.

Snímače T02.01; T02.02: Snímače měří v rozsahu -30 – 130 °C. Lze s ním měřit i při maximální provozní teplotě 95 °C.

b) Zvolené ventily:

	Označení	Mechanické vlastnosti	Provozní podmínky	Maximální průtok	Doba přestavení	Způsob otevírání	Datasheet
1	V01.01	příruba DN125	-10...120 °C 1600 kPa	250 m ³ /h	150 s	servopohon	URL
2	V01.02						
3	V01.03						
4	V01.04	vnější závit DN23	-196...185 °C 200 kPa... 5 MPa	-	-	-	URL
5	V02.01	vnitřní závit DN50	-40...185 °C 3,5 MPa	-	-	ruční	URL
6	V02.02						
7	V02.03						
8	V02.04						
9	V02.05	příruba DN50	5...120 °C 600 kPa	40 m ³ /h	113 s	zdvihový servopohon	URL

Ventily V01.01; V01.02; V01.03: Byly vybrány ventily pro potrubí o průměru DN125. Materiál ventilu je z nerezové oceli, která je vhodná pro potravinářské odvětví. Dále jsou říditelné za pomoci servopohonů, které budou popsány níže. Dle zadání splňují provozní podmínky – do 120 °C, je říditelný a pro potrubí o průměru DN125.

Přetlakový ventil V01.04: Nerezový pojistný ventil nastavitelný v rozmezí 200 kPa – 5 MPa. Hodnota nastavení musí být předem známa. Určen pro průměr potrubí DN23. Je vhodný pro jakýkoliv druh unikajícího plynu. Je vhodný pro teploty až do 185 °C.

Ventily V02.01; V02.02; V02.03; V02.04: pro průměr potrubí DN50, určené pro studenou i horkou vodu a provozní podmínky až do 185 °C, což splňují všechny podmínky zadání jako je maximální přípustná teplota.

Ventil V02.05: pro průměr potrubí DN50, je možnost řízení ventilu, určen pro medium vody a splňuje podmínku maximální přípustné teploty. Provozní podmínky až do 120 °C.

c) Zvolené motory a čerpadla:

	Označení	Krouticí moment	Jmenovité napětí	Jmenovitý proud	Jmenovité otáčky	Provozní podmínky	Datasheet	Pozn.
1	V01.01M	40 Nm	24 V DC/AC	460 mA	-	-30...50 °C	URL	*1
2	V01.02M							
3	V01.03M							
4	M01.01	10 Nm	230 VAC	6,5 A	1445 ot./min	-20...40 °C	1LE1003-0EB4	*2
5	V02.05M	zdvih 1500N	24 V DC/AC	83 mA	-	0...50 °C	URL	*1
6	P02.01A	-	230 VAC	2,37 A	-	-10...110 °C 1 Mpa	URL	
7	P02.01B							

*1: Standardní servomechanismy pro přidružené ventily.

*2: Asynchronní elektromotor pro míchadlo. Výsledný krouticí moment za převodovkou je $10 \cdot 38 = 380$ Nm a otáčky $1445/38 = 38$ ot./min.

Servomechanismy V01.01M; V01.02M; V01.03M: modulační rotační pohony s funkcí nouzového ovládání. Krouticí moment 40 Nm a spojité ovládání DC (0)2-10 V.

Servomechanismus V02.05M: zdvihový pohon pro 3-cestné zdvihové ventily. Ovládání spojité DC v rozsahu (0)2-10 V.

Motor M01.01: Krouticí moment 10Nm, jmenovité otáčky 1445 ot./min. Splňuje podmínky zadání.

Čerpadla P02.01A; P02.01B: Vhodné pro teploty až do 110 °C a pro potrubí o průměru DN50. Splňují podmínky z parametrů zadání.

4. Elektrotechnické schéma

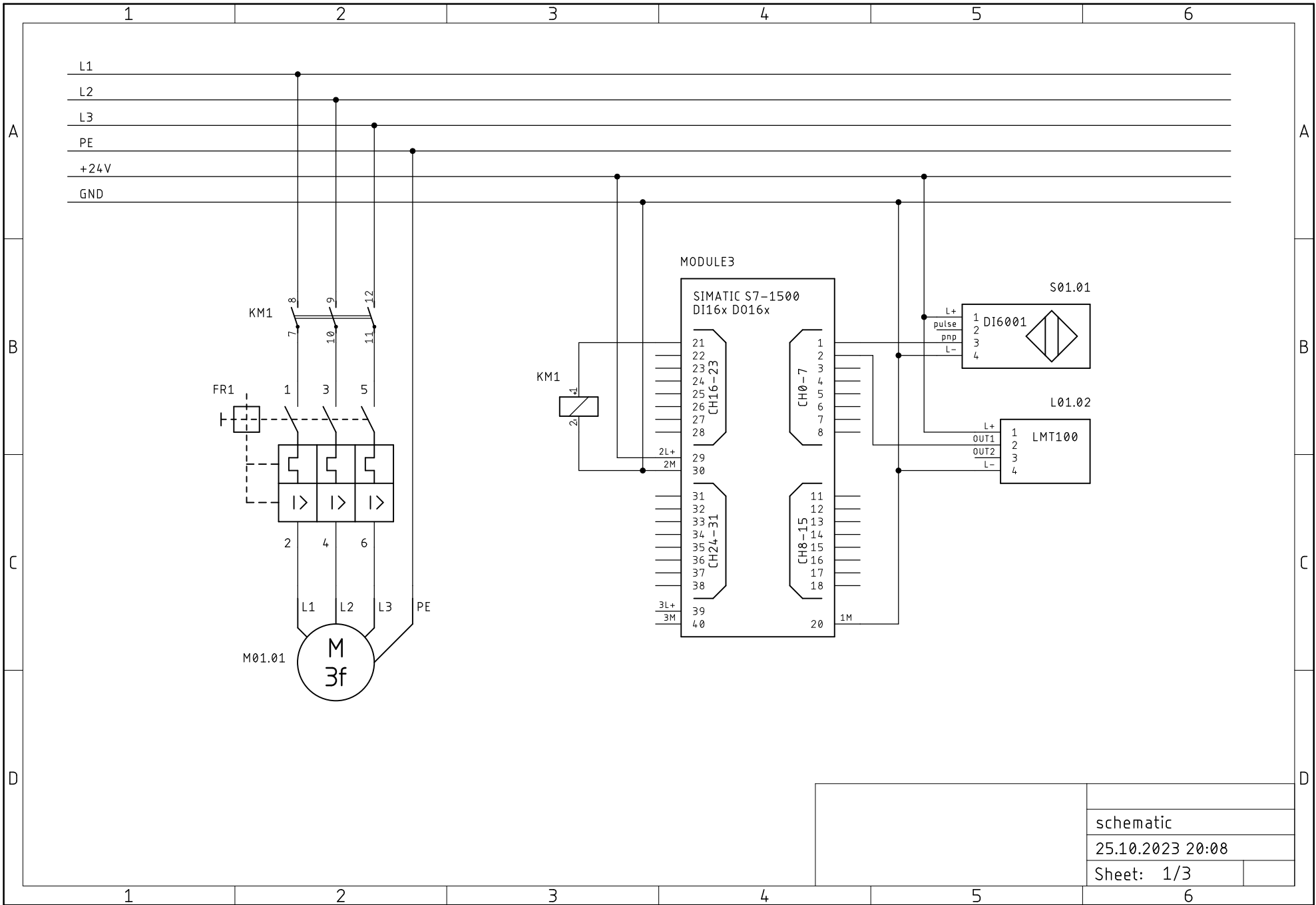
a) Zvolené moduly:

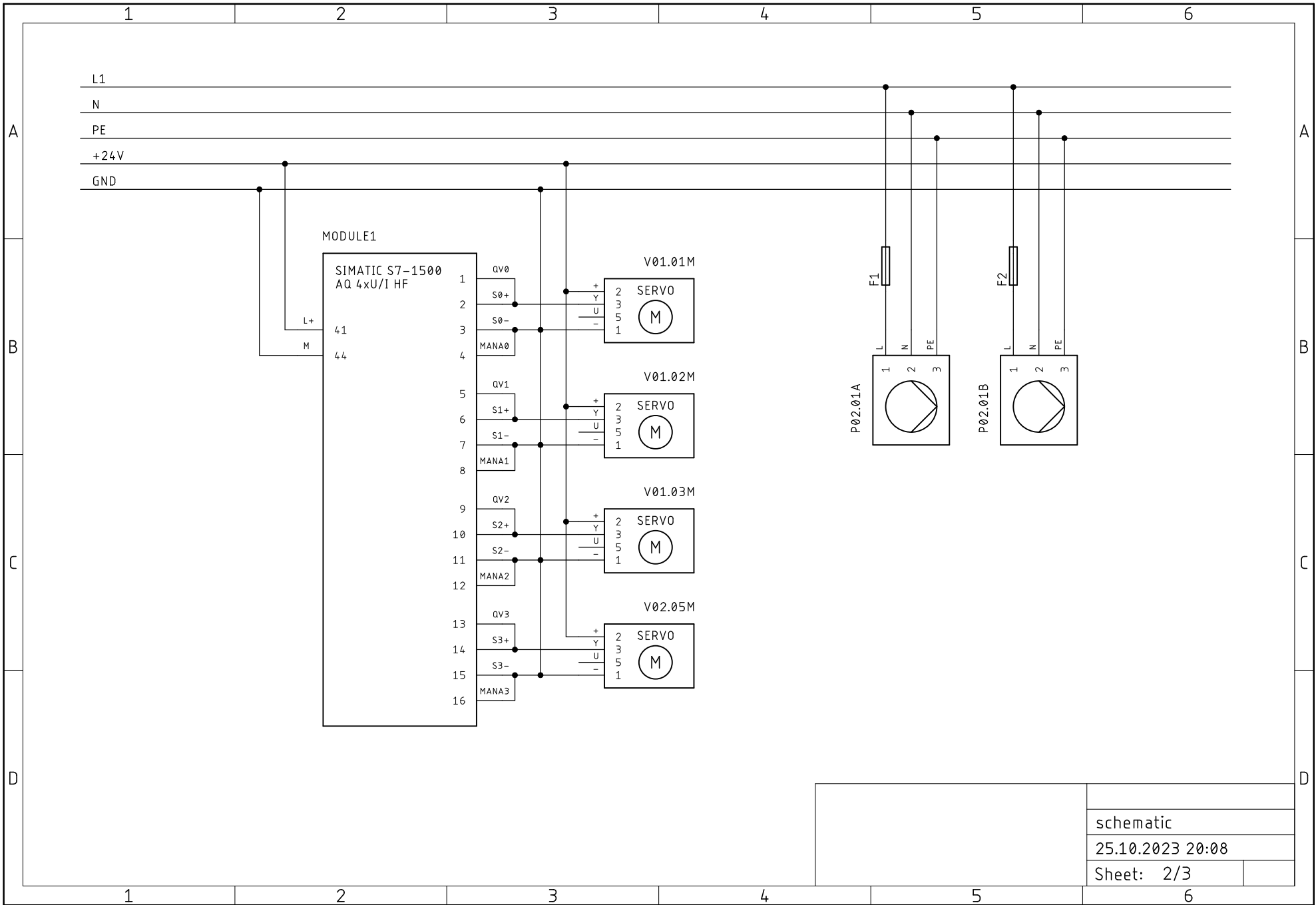
	Označení	Typ modulu	Popis	Datasheet	Poznámka
1	MODULE1	Analogový výstupní modul	AQ 4xU/I HF	URL	
2	MODULE2	Analogový vstupní modul	AI 8xU/I/RTD BA	URL	
3	MODULE3	Digitální vstupní/výstupní modul	DI 16x24VDC DQ16x24VDC/0,5A	URL	
4	-	CPU	SIMATIC S7-1500	URL	*1
5	-	Zdroj	PS 25W 24 V DC	URL	*1

*1: Jsou připojeny za pomoci šasi

b) Další přidané součástky:

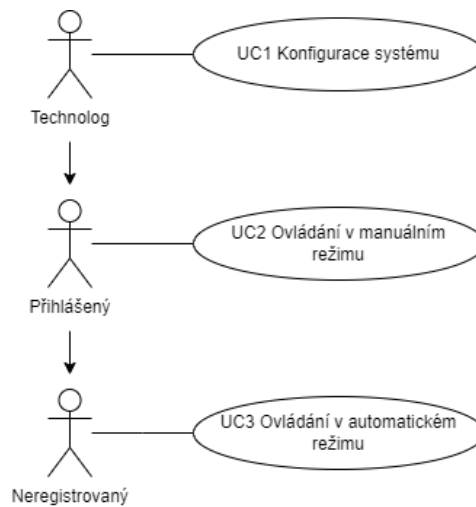
	Označení	Typ modulu	Datasheet
1	KM1	Stykač	URL
2	FR1	Motorový spouštěč	URL
3	F1	Pojistka	URL
4	F2		





5. UML diagramy

a) Use-Case diagram:



Obr.5.: User-Case diagram

Specifikace:

UC1 – Konfigurace systému:

Krátký popis

Use case umožňuje nastavení konfigurace pasterizačního systému.

Aktéři

Technolog
Systém

Podmínky pro spuštění

Technolog musí vlastnit administrativní účet v daném systému.

Základní tok

1. Systém vygeneruje uživatelské rozhraní umožňující přihlášení technologa
2. Technolog vyplní přihlašovací údaje (uživatelské jméno a heslo)
3. Systém ověří data od technologa
4. Systém následně pošle validační zprávu na mail technologa a vygeneruje pole pro vepsání doručeného kódu ze zprávy
5. Technolog vepíše kód z svého mailu a je připuštěn
6. Systém připustí technologa do nastavení konfigurace systému
7. Po změnách konfigurace a následného potvrzení technologem jsou změny uloženy

Alternativní tok 1

- 3.1 Pokud technolog zadal nesprávné uživatelské údaje, systém vyhlásí chybu, odstraní vyplněné údaje a technolog pokračuje v základním toku 2.

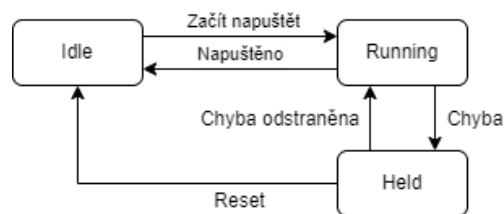
Alternativní tok 2

- 5.1 Pokud technolog zadal nesprávný kód, systém vyhlásí chybu, odstraní vyplněné údaje a systém se vrátí do bodu 4 základního toku.

Podmínky pro dokončení

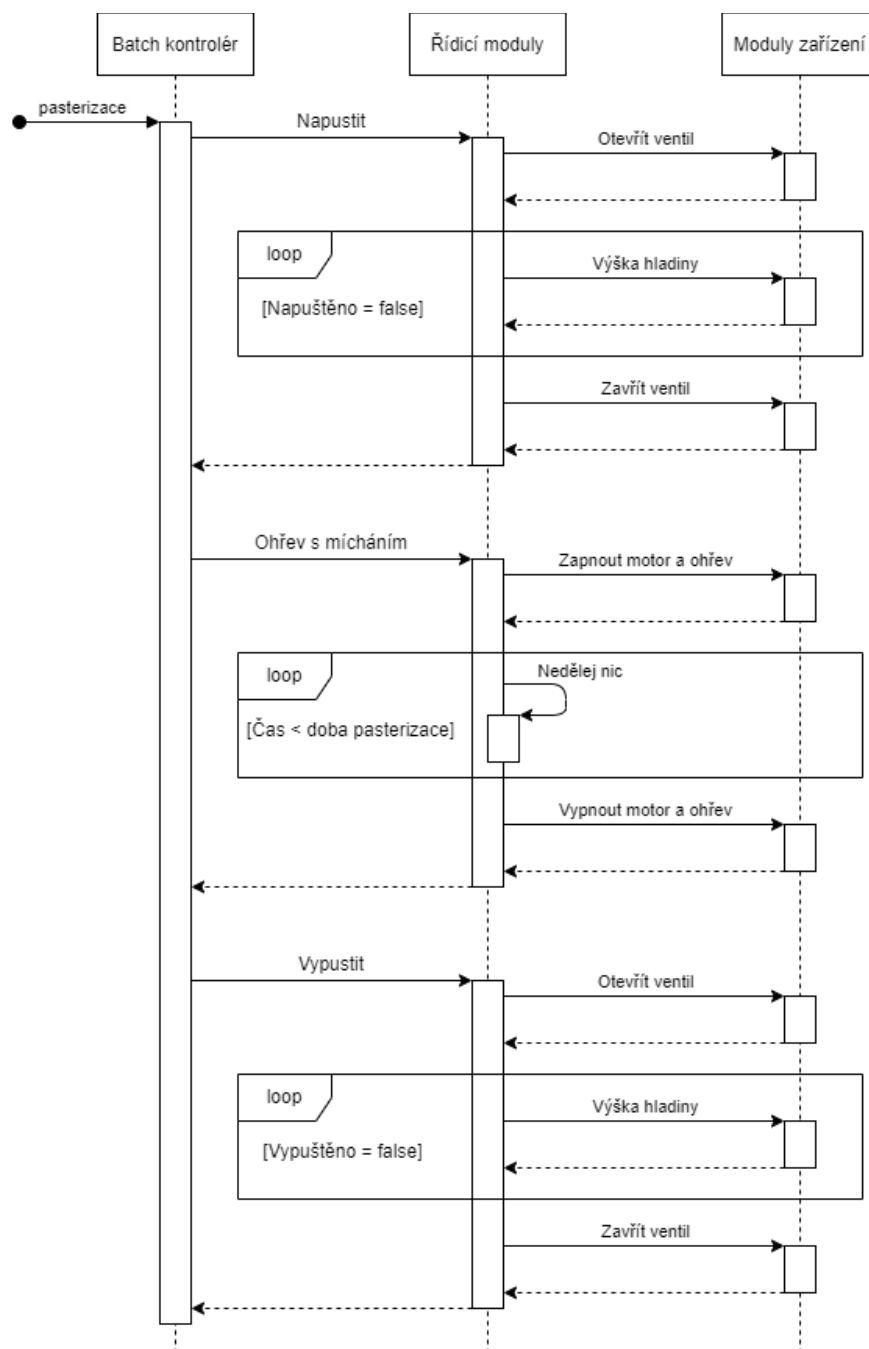
Technolog uloží změny konfigurace systému, potvrdí změnu a případně odhlásí se ze systému

b) Stavový diagram:



Obr.6.: Stavový diagram

c) Sekvenční diagram:



Obr.7.: Sekvenční diagram

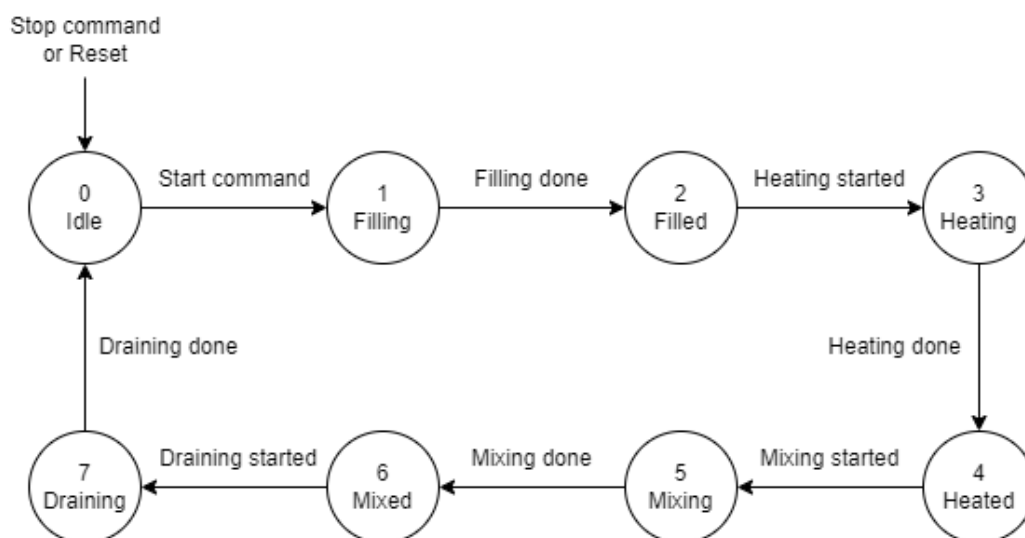
6. Technická dokumentace projektu

a) Implementace řídicího SW a vlastní inovace

Jednotlivé bloky byly doplněny dle komentářů a návodu, otestovány a okomentovány. Oproti zadání zde bylo provedeno několik změn:

- Ve fázi míchání je možné do parametru TimeSec dosadit hodnotu -1. V tomto případě nedojde k automatickému ukončení fáze Running a míchání bude pokračovat, dokud nebude fáze ukončena manuálně. Toho je využito při zahřívání obsahu tanku a současném míchání, protože není předem znám čas, za který regulátor dosáhne požadované hodnoty.
- Ve fázi zahřívání je po stabilizaci teploty v požadovaném intervalu nastaven parametr done, ale fáze Running není automaticky ukončena. Toho je využito pro držení žádané teploty během míchání.

V PLC byl vytvořen i kód pro spuštění výrobního procesu jedné dávky. Jedná se o stavový automat, který je možné spustit nebo ukončit z HMI. Automat spouští jednotlivé fáze v definovaném pořadí a po vytvoření jedné dávky je ukončen. Během zahřívání je obsah tanku současně míchán a během míchání je teplota držena na požadované hodnotě.

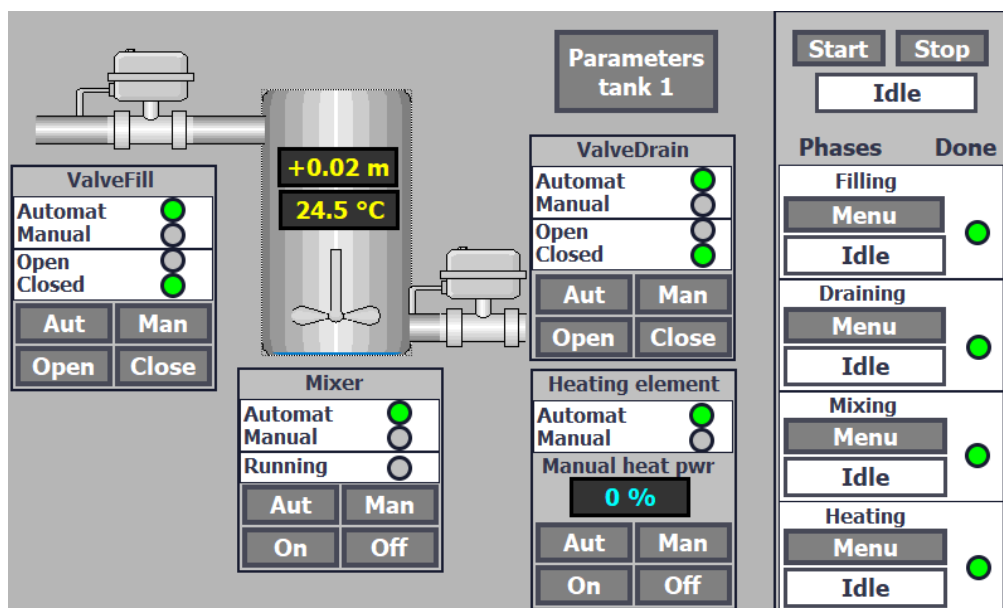


Obr.8.: Stavový diagram výrobního procesu

b) Návrh HMI

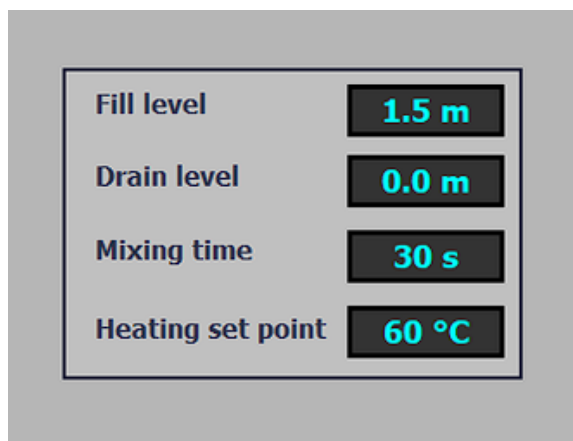
HMI bylo dokončeno a otestováno, ale nebylo oproti kostře výrazně změněno. Jedinou inovací je přidání tlačítek a indikátoru pro automatické spouštění fází v pravém horním rohu a přidání indikace stavu Done jednotlivých fází.

Hlavní obrazovka obsahuje sekce pro všechny akční členy. V nich je možné přepnout mezi automatickým nebo manuálním ovládáním daného členu. V manuálním režimu je možné člen ovládat příslušnými tlačítky (On/Off nebo Open/Close). V automatickém režimu člen ovládá příslušná fáze, jejichž nastavení se nachází na pravé straně obrazovky. Jednotlivé fáze je možné opět ovládat manuálně pomocí tlačítek Start, Stop, Pause, Resume. Automaticky je možné fáze spouštět z nadřazeného systému nebo pomocí stavového automatu z PLC, který lze spustit nebo zastavit v pravém horním rohu.



Obr.9.: Hlavní obrazovka HMI

Nastavitelnými parametry tanku je výška hladiny při napouštění a vypouštění, čas fáze míchání a požadovaná teplota fáze zahřívání.

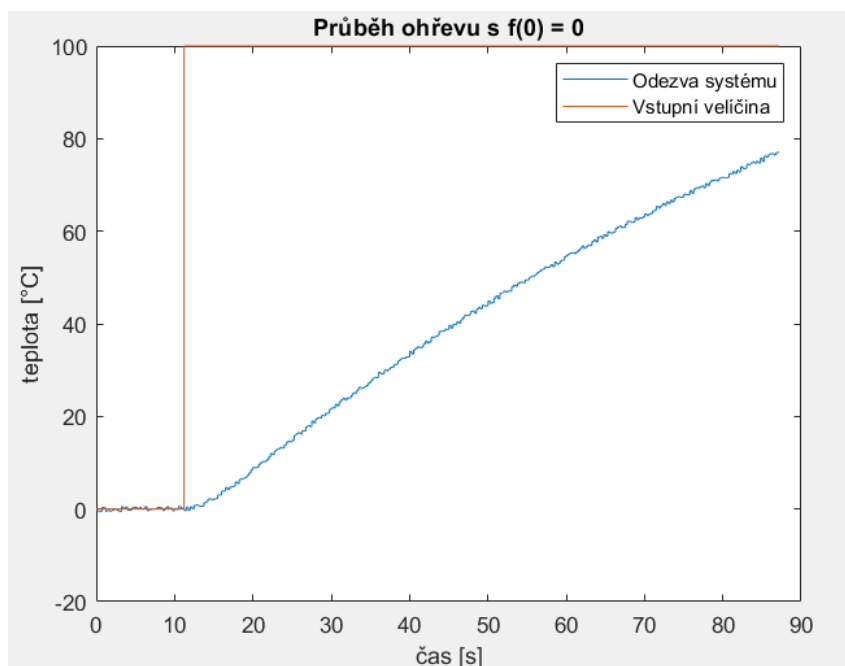


Obr.10.: Obrazovka parametrů tanku HMI

c) Návrh regulátoru

1) Identifikace parametrů soustavy:

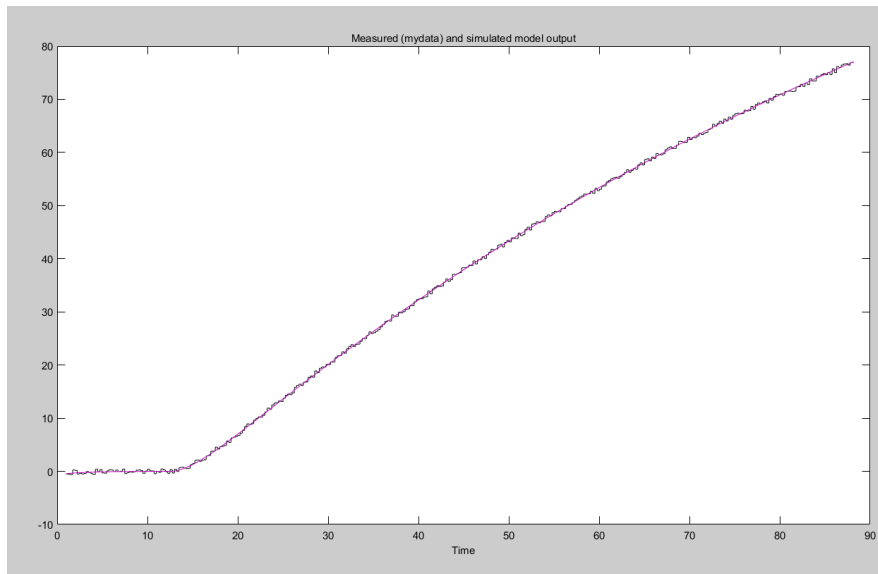
Z PLC byly získány data tak, že byl tank prvně napuštěn kapalinou na určitou hladinu a následně byl nastavený výkon ohřevu na 100 %. Byly odečítány data, dokud teplota nedosáhla 100 °C. Po dosažení 100 °C se teplota dále nezvyšovala. Vstupní data z PLC byly prvně předzpracována, aby počáteční podmínka $f(0) = 0$. Průběhy získané z PLC lze vidět na obrázku *obr.11*. Dále došlo k identifikaci parametrů této soustavy.



Obr.11.: Získané průběhy z PLC s počáteční podmínkou $f(0) = 0$

Identifikace parametrů soustavy proběhla za pomoci nástroje *Systém Identification Toolbox*. Přenos soustavy byla vyjádřena za pomoci postupného zvyšování kořenů a nul. Z nich bylo postupně odečítána přesnost (Best Fit). Při zvyšování řádu se už přesnost nijak neměnila. Nejvyšší získaná přesnost je 98,85 %. Proto byl vybrán přenos s nejmenším řádem. Zvyšováním řádu by se zbytečně zvyšovala složitost řešení. Na obrázku *obr.12* lze vidět průběh soustavy po identifikaci. Modře je vykreslena naměřená data a červeně průběh soustavy F_s . Výsledný přenos soustavy F_s je:

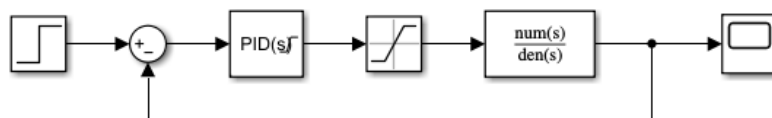
$$F_s(s) = \frac{-0,001145s + 0,005118}{s^2 + 0,3583s + 0,003327}$$



Obr.12.: Průběh identifikace soustavy.

2) Návrh regulátoru:

Regulátor byl navržen za pomoci Matlab Simulinku. Na obrázku *obr. 13* lze vidět použitý regulační obvod. Byl navržen PID regulátor nastavený jako *ideal* se saturací výstupu na 0-100 s použitou metodou Anti-Windup. Následně byl použit PIDTune pro provedení návrhu regulátoru. Výsledný průběh byl navržen jako kompromis požadavků: robustní na poruchy a dostatečně rychlý. Dále musí splňovat kritéria jako maximální překmit musí být menší než 20% ustálené hodnoty; nesmí mít více než 2-3 kmity. Na obrázku *obr. 14* jsou parametry navrženého regulátoru a na *obr.15* průběhu PID regulátoru.



Obr.13.: Regulační obvod pro návrh regulátoru

▼ Compensator formula

$$P \left(1 + I \frac{1}{s} + D \frac{N}{1 + N \frac{1}{s}} \right)$$

Main Initialization Saturation Data Types State Attributes

Controller parameters

Source: internal

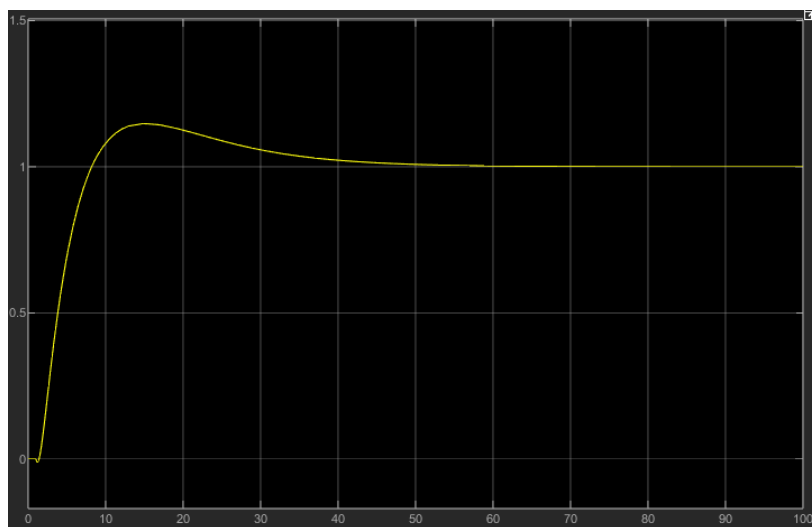
Proportional (P): 79.7481693220603

Integral (I): 0.0651904762352976 ☐ Use I*Ts (optimal for c

Derivative (D): 3.06690258058235

Filter coefficient (N): 146.709197347077 ☒ Use filtered derivative

Obr.14.: Parametry navrženého PID regulátoru



Obr.15.: Průběh navrženého regulátoru.

3) PID regulátor v PLC:

TIA portál používá PIDT1 regulátor s anti-windup, váhováním proporcionální a derivační složky. Tedy jeho rovnice je:

$$y = K_P \left[(b \cdot w - x) + \frac{1}{T_i \cdot s} (w - x) + \frac{T_D \cdot s}{a \cdot T_D \cdot s + 1} (c \cdot w - x) \right],$$

Kde y je výstupní hodnota PID; K_P je proporcionální zesílení, s – Laplaceův operátor; b – váha proporcionální složky; w – setpoint; x – procesní hodnota, T_i – doba integračního zásahu; T_D – doba derivačního zásahu; a – koeficient derivačního zpoždění; c – váha derivačního zásahu; $DeadZone$ – šířka Dead zóny a $ControlZone$ – šířka Control zóny.

Převod je vypočítán níže – výpočet koeficientů za pomoci porovnání s rovnicí z MatLabu. A použité hodnoty jsou na obrázku obr. 16. Navržený PID byl otestován a výsledný průběh regulované hodnoty lze vidět na obr. 17.

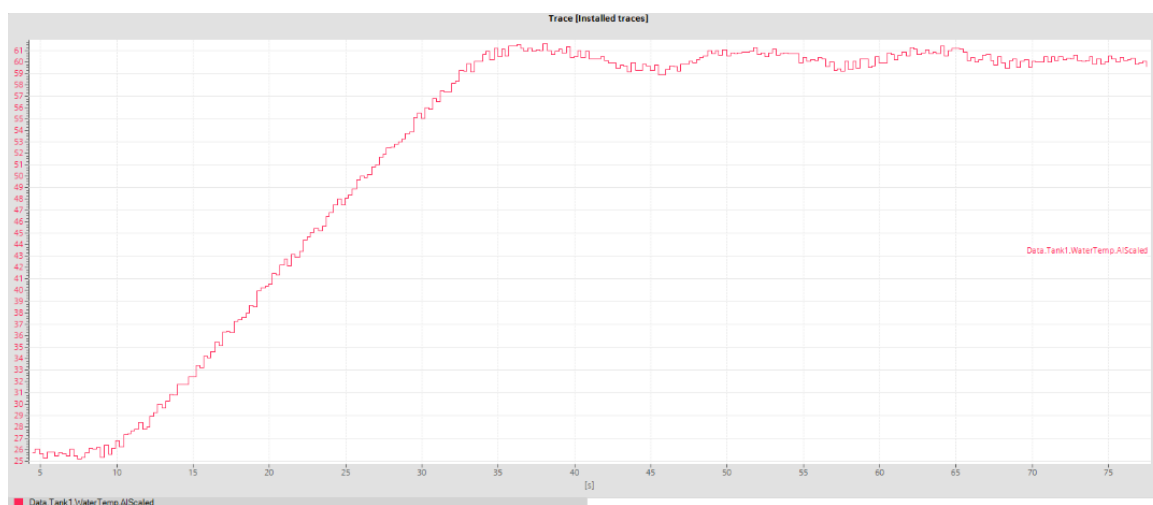
$$D \frac{N}{1 + N \frac{1}{s}} = \frac{T_D s}{a T_D s + 1} = \frac{T_D s \frac{1}{a}}{T_D s (1 + \frac{1}{a T_D s})} = \left| N = \frac{1}{a T_D} \right| = \frac{T_D N}{1 + N \frac{1}{s}}$$

$$\rightarrow T_D = D; \quad a = \frac{1}{T_D N}$$

$$\rightarrow K_P = P; \quad T_i = \frac{1}{I}$$

Proportional gain:	80.0
Integral action time:	15.0 s
Derivative action time:	3.0 s
Derivative delay coefficient:	0.0022
Proportional action weighting:	1.0
Derivative action weighting:	1.0
Sampling time of PID algorithm:	0.01 s
Dead zone width:	0.0 °C
Control zone width:	3.402822E+38 °C

Obr.16.: Nastaveny hodnoty pro regulátor v PLC



Obr.17.: Výsledný průběh z PLC