**Vysoké učení technické v Brně**

**Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií**

Semestrální práce

MPC-AUP

Radim Říha, 221013

Petr Šopák, 221022

Brno, 2023

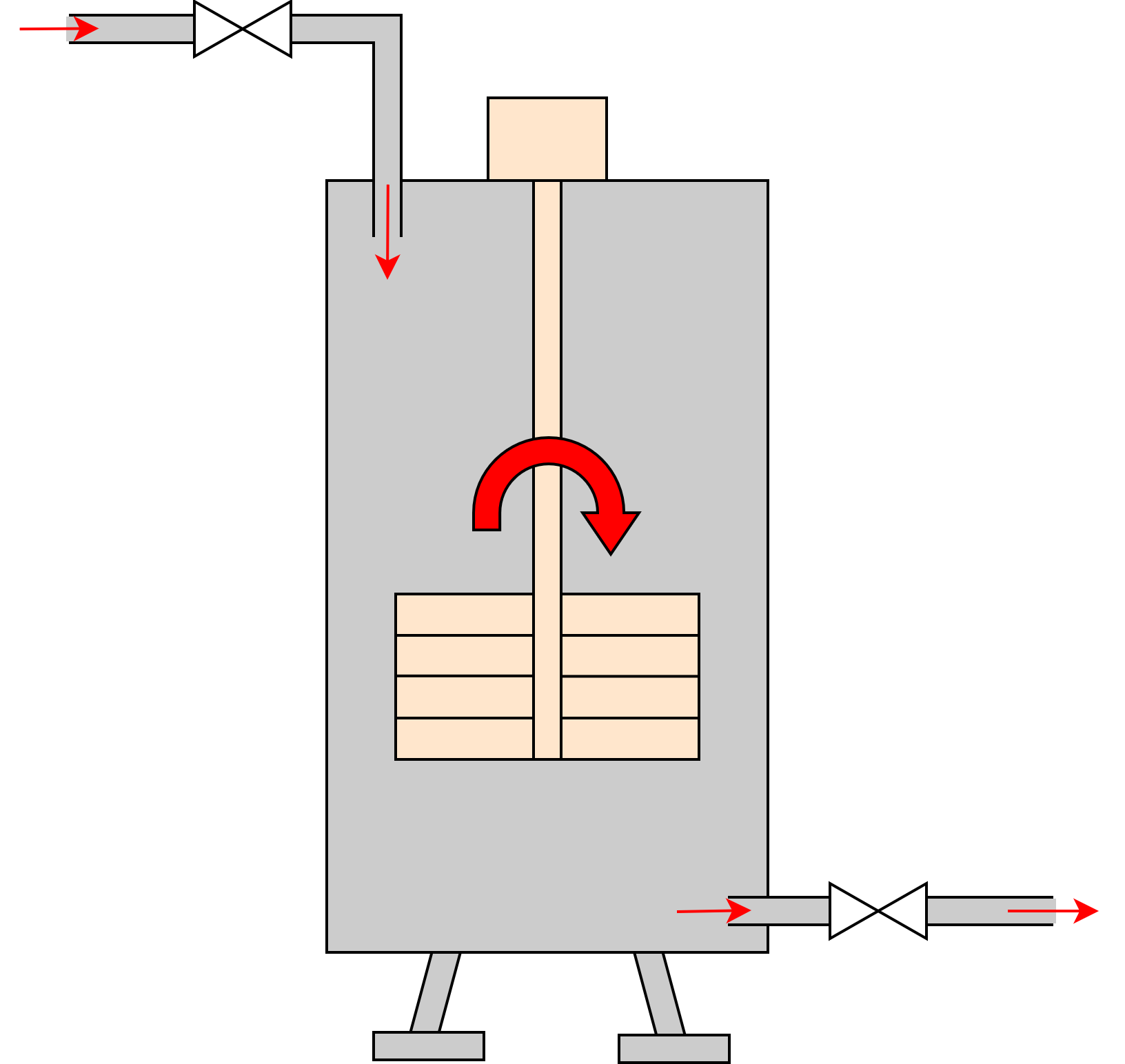
**Zadání:**

Technologický proces slouží k pasterizaci kapalin. Nerezová nádrž je vysoká 2000 mm a její objem je přesně 2 m3 . 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.

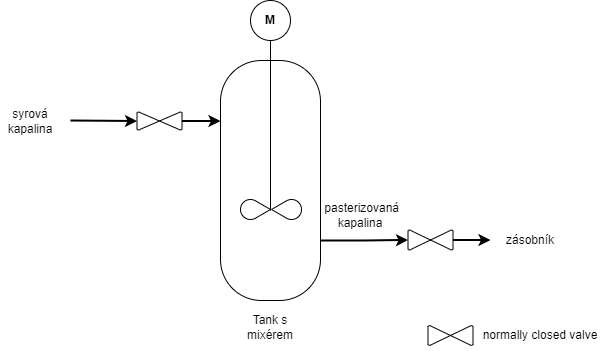
**Požadavky:**

1. Nerezová nádrž – výška 2000 mm a objem 2 m3
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:**

Obsah obrázku diagram, skica, kresba, Technický výkres

Popis byl vytvořen automaticky

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

Obsah obrázku text, diagram, skica, kresba

Popis byl vytvořen automaticky

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 čisticí 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**

1. **Zvolené snímače:**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | Označení | Rozsah | Citlivost | Rozlišení | Provozní podmínky | Chyba měření | Mechanické vlastnosti | Rozhraní | Data |
| 1 | F01.01 | 0…135 m3/h | 0,07 V\*h/m3 | - | -20…120 °C 1600 kPa | ±2 % | příruba DN125 | 0,5…10 V | [URL](https://www.bola.cz/admin/files/e_product_files/9/8625/src_FMxxxF-SZ_KL-eng.pdf) |
| 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](https://docs.rs-online.com/1add/0900766b815c8421.pdf) |
| 4 | T01.02 | -40…300 °C | 13,8 Ω/K | - | - | ±6 K | v motoru | odpor | [URL](https://cdn-reichelt.de/documents/datenblatt/C650/KTY84_SER.pdf) |
| 5 | S01.01 | 3…6000 ot./min | - | - | -20…80°C | - | závit M18 | pulzní | [URL](https://media.automation24.com/datasheet/en/DI6001.pdf) |
| 6 | L01.01 | 0,15…2 m | 8,65 mA/m | <1 mm | -30…70°C | ±0,15 % | závit G1 | 4…20 mA | [URL](https://www.bola.cz/admin/files/e_product_files/9/9271/src_ulm-70-dat-cz_n4_08_2020.pdf) |
| 7 | L01.02 | on/off | - | - | -40...100°C | - | závit G3/4 | NPN/PNP | [URL](https://www.bola.cz/admin/files/e_product_files/13/12979/src_11406185_cs.pdf) |
| 8 | F02.01 | 0…21 m3/h | 0,45 V\*h/m3 | - | -20…120 °C 1600 kPa | ±2 % | závit DN50 | 0,5…10 V | [URL](https://www.bola.cz/admin/files/e_product_files/9/8620/src_belimo_FM..R-SZ_datasheet_en-gb.pdf) |
| 9 | T02.01 | -30...130 °C | 0,39 Ω/°C | - | 5…95 % r. v. | ±1 K | příložné čidlo | odporový výstup | [URL](https://www.bola.cz/admin/files/e_product_files/11/11098/src_QAD2.....pdf) |
| 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.

1. **Zvolené ventily:**

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | Označení | Mechanické vlastnosti | Provozní podmínky | Maximální průtok | Doba přestavení | Způsob otevíraní | Datasheet |
| 1 | V01.01 | příruba DN125 | -10...120 °C 1600 kPa | 250 m3/h | 150 s | servopohon | [URL](https://www.bola.cz/admin/files/e_product_files/3/3026/src_R6..W..-S8_datasheet_en-gb.pdf) |
| 2 | V01.02 |
| 3 | V01.03 |
| 4 | V01.04 | vnější závit  DN23 | -196…185 °C  200 kPa… 5 MPa | - | - | - | [URL](https://www.kompresory-vzduchotechnika.cz/user/related_files/katalogy-katalog-list-485.pdf?fbclid=IwAR3z01DGnzlcFLkLkJaVd6R7hUdZWTHkyIKdW8MHe0DzCudZV3pxjcXE-E0) |
| 5 | V02.01 | vnitřní závit DN50 | -40...185 °C 3,5 MPa | - | - | ruční | [URL](https://www.bola.cz/admin/files/e_product_files/3/2689/src_katalogovylistr250d%20(1).pdf) |
| 6 | V02.02 |
| 7 | V02.03 |
| 8 | V02.04 |
| 9 | V02.05 | příruba DN50 | 5...120 °C 600 kPa | 40 m3/h | 113 s | zdvihový servopohon | [URL](https://www.bola.cz/admin/files/e_product_files/8/7642/src_KL_H7xxR.pdf) |

**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 řiditelné za pomocí servopohonů, které budou popsány níže. Dle zadání splňují provozní podmínky – do 120 °C, je řiditelný 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.

1. **Zvolené motory a čerpadla:**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | Označení | Kroutící 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](https://www.bola.cz/admin/files/e_product_files/4/3539/src_GRK24A-SR-5_datasheet_en-gb.pdf) | \*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](https://www.elektromotory.net/upload/file/katalog_1le1.pdf?s=21020730) | \*2 |
| 5 | V02.05M | zdvih 1500N | 24 V DC/AC | 83 mA | - | 0…50 °C | [URL](https://www.bola.cz/admin/files/e_product_files/3/3105/src_sv24a-sr-tpc_datasheet_cz-cz.pdf) | \*1 |
| 6 | P02.01A | - | 230 VAC | 2,37 A | - | -10…110 °C 1 Mpa | [URL](https://www.bola.cz/admin/files/e_product_files/12/12285/src_99221361_magna1_50120_f_n.pdf) |  |
| 7 | P02.01B |

\*1: Standardní servomechanismy pro přidružené ventily.

\*2: Asynchronní elektromotor pro míchadlo. Výsledný krouticí moment za převodovkou je

10\*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**

1. **Zvolené moduly:**

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | Označení | Typ modulu | Popis | Datasheet | Poznámka |
| 1 | MODULE1 | Analogový výstupní modul | AQ 4xU/I HF | [URL](https://cache.industry.siemens.com/dl/files/585/109483585/att_901733/v1/s71500_aq_4xu_i_hf_manual_en-US_en-US.pdf?fbclid=IwAR2NbZDqj4Lt8vTWjV-IrRnaD0cVxK3N2hEioAN1KNZy800LTRvp7BCxqjY) |  |
| 2 | MODULE2 | Analogový vstupní modul | AI 8xU/I/RTD BA | [URL](https://cache.industry.siemens.com/dl/files/142/109763142/att_976511/v1/s71500_ai_8xu_i_rtd_ba_manual_en-US_en-US.pdf?fbclid=IwAR1F-2BC4PZkIfuhnCYTnMuchNYmFVh82czrXRTaxwXOIjgn6SZoQA35Zns) |  |
| 3 | MODULE3 | Digitální vstupní/výstupní modul | DI 16x24VDC DQ16x24VDC/0,5A | [URL](https://cache.industry.siemens.com/dl/files/523/83501523/att_42300/v1/s71500_di_16x24vdc_dq_16x24vdc_0.5a_ba_manual_en-US_en-US.pdf?fbclid=IwAR0ZxGFH91MMGopUBveTw9Jof34M6U0NsT-I4QyywDTJjr99j2PRPEc-OAk) |  |
| 4 | - | CPU | SIMATIC S7-1500 | [URL](https://www.electricautomationnetwork.com/PDF/PIM/SIE/EN_6ES7511-1AK02-0AB0.pdf) | \*1 |
| 5 | - | Zdroj | PS 25W 24 V DC | [URL](https://docs.rs-online.com/3d00/A700000006977415.pdf) | \*1 |

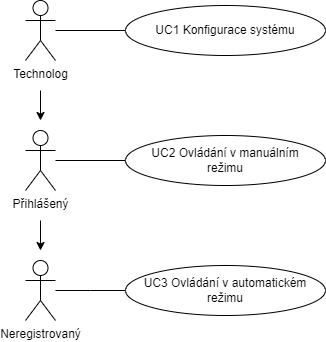
\*1: Jsou připojeny za pomocí šasi

1. **Další přidané součástky:**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | Označení | Typ modulu | Datasheet |
| 1 | KM1 | Stykač | [URL](https://www.tme.eu/Document/038de630a0a8cbabdc47d79725b7ebf6/ABB-ESB-SERIES-EN.pdf?fbclid=IwAR1F-2BC4PZkIfuhnCYTnMuchNYmFVh82czrXRTaxwXOIjgn6SZoQA35Zns) |
| 2 | FR1 | Motorový spouštěč | [URL](https://www.tme.eu/Document/f1035e294270fe4525aaa28751af4426/DE1-DTE-EN.pdf?fbclid=IwAR3Vc3G5v3NXerZJjggwt0hng5y4qcRxSxZwYF9SiZmnuMty2c2m02VYz9w) |
| 3 | F1 | Pojistka | [URL](https://www.tme.eu/Document/a152c868669eeff41e6e8c99880cf419/LSN501.pdf?fbclid=IwAR277_c2uUyZ4K5_fmQ4iS0iRXs5CxfMi9Ulh659xpTyY85fWZ-Wy1ZBZCA) |
| 4 | F2 |

**5. UML diagramy**

1. **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 rozhrání umožňující přihlášení technologa
2. Technolog vyplní přihlašovací údaje (uživatelské jméno a heslo)
3. Sytém 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**

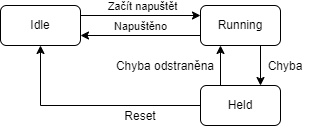
5.1 Pokud technolog zadal nesprávný kód, systém vyhlásí chybu, odstraní vyplněné údaje a systém se vrátí do bodu 4 základního toku.

**Podmínky pro dokončení**

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

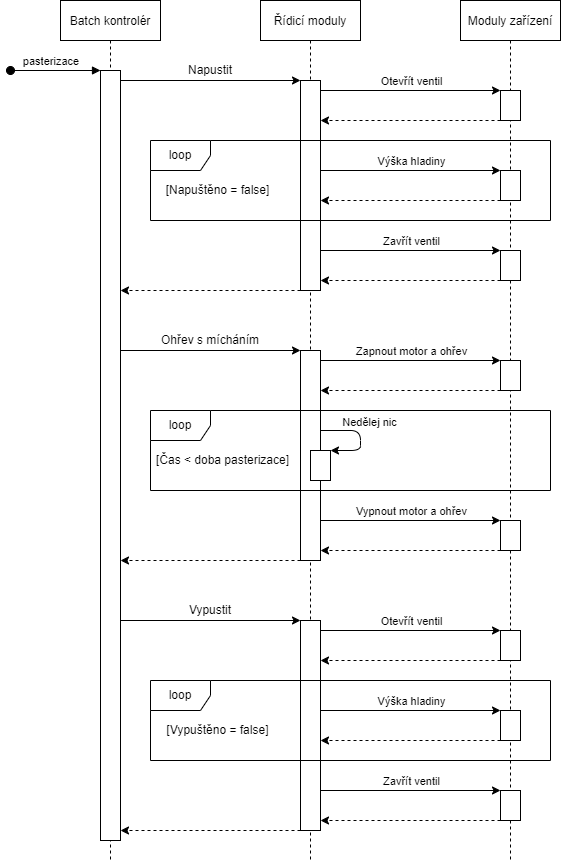
systému

1. **Stavový diagram:**

****

Obr.6.: Stavový diagram

1. **Sekvenční diagram:**



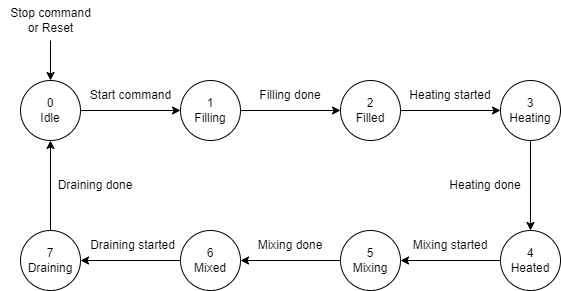
Obr.7.: Sekvenční diagram

**6. Implementace řídicího SW**

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

**7. 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.

Obsah obrázku text, snímek obrazovky, Multimediální software

Popis byl vytvořen automaticky

Obr.9.: Hlavní obrazovka HMI

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

Obsah obrázku text, snímek obrazovky, design

Popis byl vytvořen automaticky

Obr.10.: Obrazovka parametrů tanku HMI

**8. Optimalizace regulačního děje**

1. **Identifikace parametrů soustavy:**

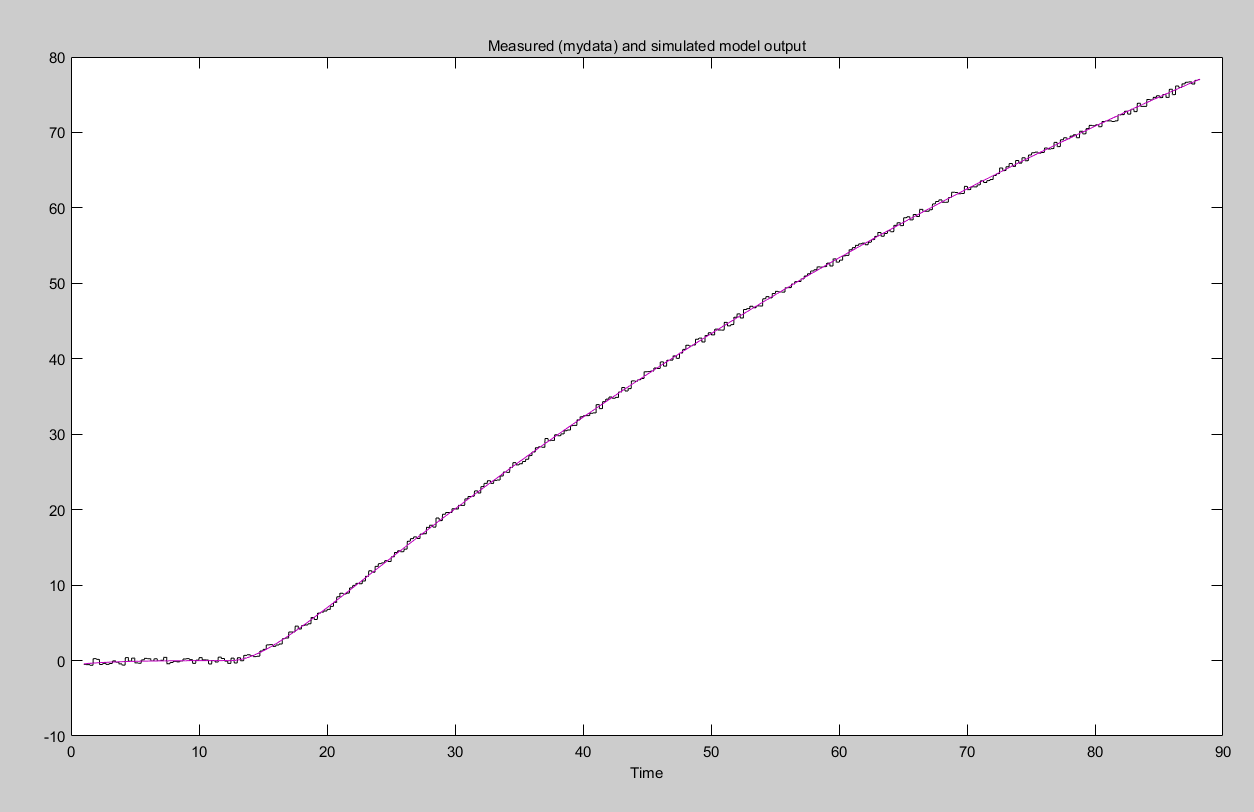
Z PLC byly získány data tak, že byl tank prvně napuštěn kapalinou na určitou hladinu a následně byl nastavený výkon ohřevu na 100 %. Byly odečítány data, dokud teplota nedosáhla 100 °C. Po dosáhnutí 100 °C se teplota dále nezvyšovala. Vstupní data z PLC byly prvně předzpracována, aby počáteční podmínka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

Obsah obrázku text, diagram, řada/pruh, Vykreslený graf

Popis byl vytvořen automaticky

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

Identifikace parametrů soustavy proběhla za pomocí nástroje *Systém Identification Toolbox.* Přenos soustavy byla vyjádřena za pomocí 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 *FS*. Výsledný přenos soustavy *FS* je:



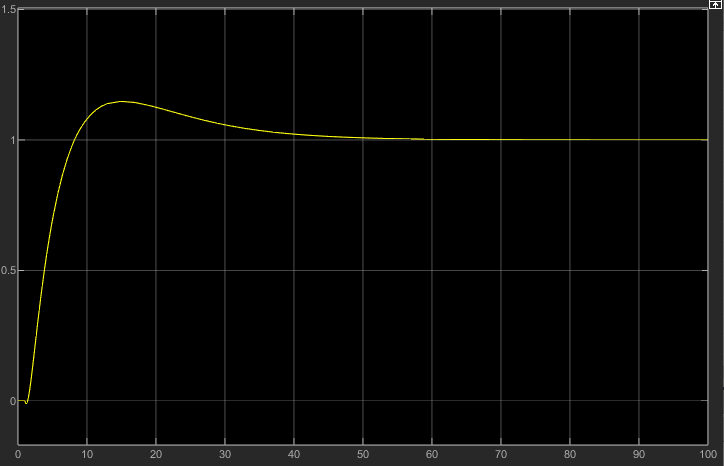
Obr.12.: Průběh identifikace soustavy.

1. **Návrh regulátoru:**

Regulátor byl navržen za pomocí Matlab Simulinku. Na obrázku *obr. 13* lze vidět použitý regulační obvod. Byl navržen PID regulátor nastaveny 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* je vykreslen přenos regulátoru. Výsledný přenos PID regulátoru je zde:

Obsah obrázku text, snímek obrazovky, Písmo, číslo

Popis byl vytvořen automaticky



1. **PID regulátor v PLC:**

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

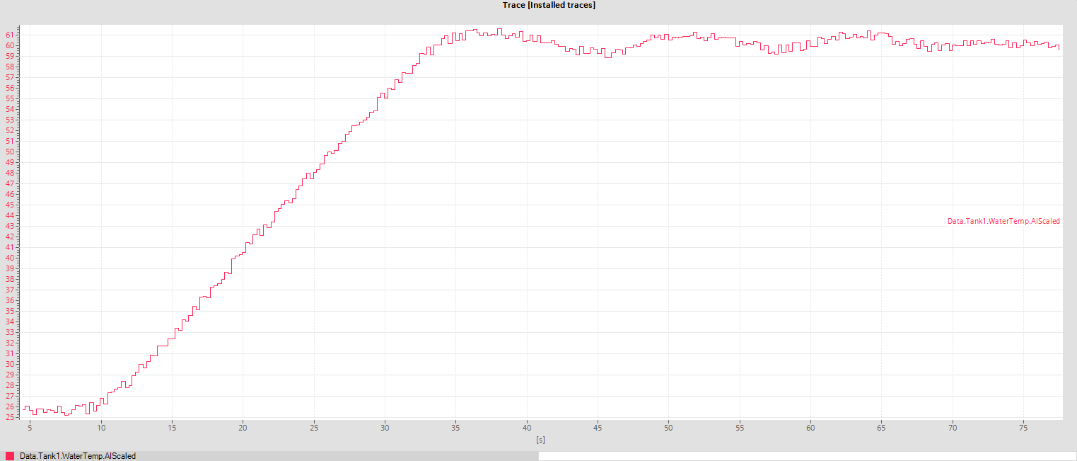
Kde *y* je výstupní hodnota PID; *KP* je proporcionální zesílení, *s* – Laplacův operátor; *b* – váha proporcionální složky; *w* – setpoint; *x* – procesní hodnota, *TI* – doba integračního zásahu; *TD* – doba derivačního zásahu; *a* - koeficient derivačního zpoždění; *c* – váha derivačního zásahu; *DeadZone* – šířka Dead zóny a *ControlZone* – šířka Control zóny.

Převod je vypočítán níže – výpočet koeficientů za pomocí porovnání s rovnicí z MatLabu. A použité hodnoty jsou na obrázku obr.15. Navržený PID byl otestován a výsledný průběh regulované hodnoty lze vidět na *obr. 16*.

Obsah obrázku text, snímek obrazovky, Písmo, číslo

Popis byl vytvořen automaticky

Obr.15.: Nastaveny hodnoty pro regulátor v PLC



Obr.16.: Výsledný průběh z PLC