



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

## MODELOVÁNÍ TEPLOVODNÍ VÝMĚNÍKOVÉ STANICE A JEJÍ REGULACE

MODELLING OF A HEAT WATER EXCHANGER AND ITS REGULATION

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

#### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Michal Černík

#### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Ondřej

Mihálik

BRNO 2022

# Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Automatizační a měřicí technika**

Ústav automatizace a měřicí techniky

**Student:** Michal Černík

**ID:** 211138

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2021/22

**NÁZEV TÉMATU:**

## Modelování teplovodní výměňkové stanice a její regulace

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

1. Seznamte se s modelem výměňkové stanice v laboratoři ÚAMT.
2. Vytvořte projektovou dokumentaci technologie.
3. V prostředí MATLAB Simulink implementujte dynamický model tepelné soustavy výměníku. V modelu zohledněte i nejdůležitější vlastnosti akčních členů a snímačů, např. postupné otevírání/zavírání ventilů, nelinearity, šum apod.
4. Navrhněte a optimalizujte regulaci získaného modelu.
5. Výsledné řešení doplňte grafickými prvky pro vizualizaci řízeného procesu.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

Yuvraj Bhushan Khare, „PID Control of Heat Exchanger System,“ International Journal of Computer Applications, 2010, roč. 8, č. 6, str. 22–27.

**Termín zadání:** 7.2.2022

**Termín odevzdání:** 10.8.2022

**Vedoucí práce:** Ing. Ondřej Mihálik

**doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.**  
předseda rady studijního programu

**UPOZORNĚNÍ:**

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Práce se zabývá modelováním teplovodní výměňkové stanice a její regulací. Součástí je projektová dokumentace obsahující teoretický rozbor a praktickou část. V teoretické části se zabývá teoretickými poznatky o všech použitých prvcích v modelu stanice. V praktické části se zabývá realizací elektrického zapojení stanice, jejím propojením s řídicím automatem, návrhem matematického modelu, simulací a návrhem regulátoru.

## **Klíčová slova**

Teplo, výměník tepla, výměna energie, termistor, regulace

## **Abstract**

The thesis deals with the modelling of a hot water heat exchanger station and its control. It includes project documentation, with theoretical and practical part. The theoretical part is dealing with theoretical knowledge about every used element that is used in the design. The practical part deals with the implementation of the electrical wiring of the station, its connection with the control automaton, design of the mathematical model, simulation and design of the controller.

## **Keywords**

Heat, heat exchanger, energy transfer, termistor, regulation

## **Bibliografická citace**

ČERNÍK, M. Návrh laboratorní úlohy s modelem teplovodní výměňkové stanice. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. 49 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Ondrej Mihálik.

## Prohlášení autora o původnosti díla

**Jméno a příjmení studenta:** *Michal Černík*

**VUT ID studenta:** *211138*

**Typ práce:** *Bakalářská práce*

**Akademický rok:** *2021/22*

**Téma závěrečné práce:** Modelování teplovodní výměňkové stanice a její regulace

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 09.08.2022

-----  
podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu semestrální práce Ing. Ondreji Mihálikovi. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé semestrální práce.

V Brně dne: 9. srpna 2022

-----  
podpis autora

# Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ .....	8
SEZNAM TABULEK.....	9
ÚVOD .....	10
<b>1. TEORETICKÝ ÚVOD .....</b>	<b>11</b>
1.1 VÝMĚNÍK TEPLA.....	11
1.2 MĚŘÍCÍ STANICE.....	12
1.2.1 Čerpadlo .....	14
1.2.2 Elektromagnetický ventil.....	15
1.2.3 Bojler .....	16
1.2.4 Průtokové snímače.....	16
1.2.5 Teplotní snímače .....	17
1.2.6 Standardizace měřené veličiny.....	18
1.3 PLC.....	19
1.3.1 Vstupy a výstupy PLC .....	20
1.3.2 TIA Portal .....	20
<b>2. PRAKTICKÁ ČÁST – KONSTRUKCE STANICE .....</b>	<b>21</b>
2.1 ELEKTRICKÉ SCHÉMA ZAPOJENÍ .....	22
2.2 MONTÁŽ.....	24
2.3 TIA PORTÁL .....	25
2.3.1 Device configuration.....	25
2.3.2 Hlavní program – main.....	29
2.3.3 HMI.....	31
2.4 MĚŘENÍ.....	31
2.4.1 Příprava stanice před měřením – uvedení do provozu.....	32
2.4.2 Záznam dat.....	32
2.4.3 Postup měření .....	33
2.4.4 Výsledek měření .....	34
<b>3. PRAKTICKÁ ČÁST – VÝPOČTY A SIMULACE .....</b>	<b>35</b>
3.1 MATEMATICKÝ MODEL VÝMĚNÍKU TEPLA.....	35
3.2 SIMULACE VE VÝVOJOVÉM PROSTŘEDÍ MATLAB SIMULINK.....	35
3.3 REGULACE .....	40
3.3.1 Úprava nasimulovaného modelu – časová konstanta.....	40
3.3.2 Určení $K_{krit}$ a $T_{krit}$ .....	44
3.3.3 Výsledný regulátor.....	45
<b>4. ZÁVĚR.....</b>	<b>47</b>
<b>LITERATURA.....</b>	<b>48</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>49</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>49</b>

# SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Deskový výměník tepla, zdroj [1] .....	11
1.2	Zjednodušené schéma systému měřicí stanice .....	12
1.3	Měřicí stanice s tepelným výměníkem .....	13
1.4	Čerpadlo pohánějící vodu ve stanici.....	14
1.5	Elektromagnetický ventil .....	15
1.6	Teplotní snímač Pt100, zdroj [2] .....	17
1.7	Závislost odporu na teplotě odporového snímače Pt100, zdroj [3] .....	18
1.8	Graf závislosti teploty na protékajícím proudu termistoru .....	19
1.9	Blokové schéma PLC, zdroj [10] .....	20
2.1	Blokové schéma systému měřicí stanice .....	21
2.2	Ochranný obvod pro zapnutí a nouzové vypnutí stanice.....	22
2.3	Ukázka zapojení teploměrů a sběrnice DB - 25 .....	23
2.4	Ukázka zapojení digitálních vstupů a výstupů, zdroj [11] .....	26
2.5	Ukázka zapojení analogových výstupů, zdroj [11].....	27
2.6	Ukázka zapojení termistorů, zdroj [11] .....	27
2.7	Očíslování pinů na konektorech .....	28
2.8	Spínání a rozeptání hlavních akčních prvků pomocí tlačítek .....	29
2.9	Rozsvícení oranžové LED.....	29
2.10	Standardizace měřené veličiny .....	30
2.11	Nastavení proměnných valve1 a valve2 pomocí bloku FC1 .....	30
2.12	Funkční blok FC1 .....	30
2.13	HMI panel .....	31
2.14	Blok Traces .....	33
3.1	Dynamický model soustavy v prostředí Matlab Simulink .....	37
3.2	Výstup dynamického systém pro B = 0,45.....	37
3.3	Výstup dynamického systém pro B = 0,5.....	38
3.4	Výstup dynamického systém pro B = 0.....	39
3.5	Blokové schéma regulačního obvodu.....	40
3.6	Graf závislosti teploty na čase.....	41
3.7	Graf závislosti teploty na čase s potlačením šumu .....	42
3.8	Porovnání naměřených a nasimulovaných dat .....	43
3.9	Dynamický model simulace s přidáním regulátorem .....	44
3.10	Graf závislosti teploty na čase měření – kritické zesílení.....	45
3.10	Graf závislosti teploty na čase měření – regulace .....	46

## SEZNAM TABULEK

2.1	Přehled proměnných.....	25
2.2	Přiřazení proměnných k jednotlivým vstupům a výstupům .....	28
3.1	Vzorce pro návrh parametrů metodou Ziegler-Nicholse .....	40

# ÚVOD

Tato práce se věnuje modelování teplovodní výměňkové stanice a její regulací. V mnoha oblastech průmyslu, jako například chemický nebo energetický, se objevuje potřeba přenášet teplo mezi dvěma různými látkami. Pomocí výměníků tepla lze efektivně převádět teplo mezi médii. Jejich využití a vysoká efektivita jsou důvodem pro jejich rozsáhlé využití.

Cílem této práce je namodelování modelu teplovodní stanice s naměřením reálných dat na reálné měřicí stanici, která je umístěná v laboratořích ÚAMT. Tato stanice disponuje primárním a sekundárním okruhem mezi kterými je připojen výměník tepla. Přes tento výměník tepla probíhá výměna tepla mezi kapalinami v primárním a sekundárním okruhu.

Práce se dělí na tři hlavní úseky. Ta první se věnuje teoretickým znalostem nejen o samotném výměníku tepla, ale i o všech ostatních použitých elementů v měřicí stanici (čerpadla, elektromagnetické ventily apod.).

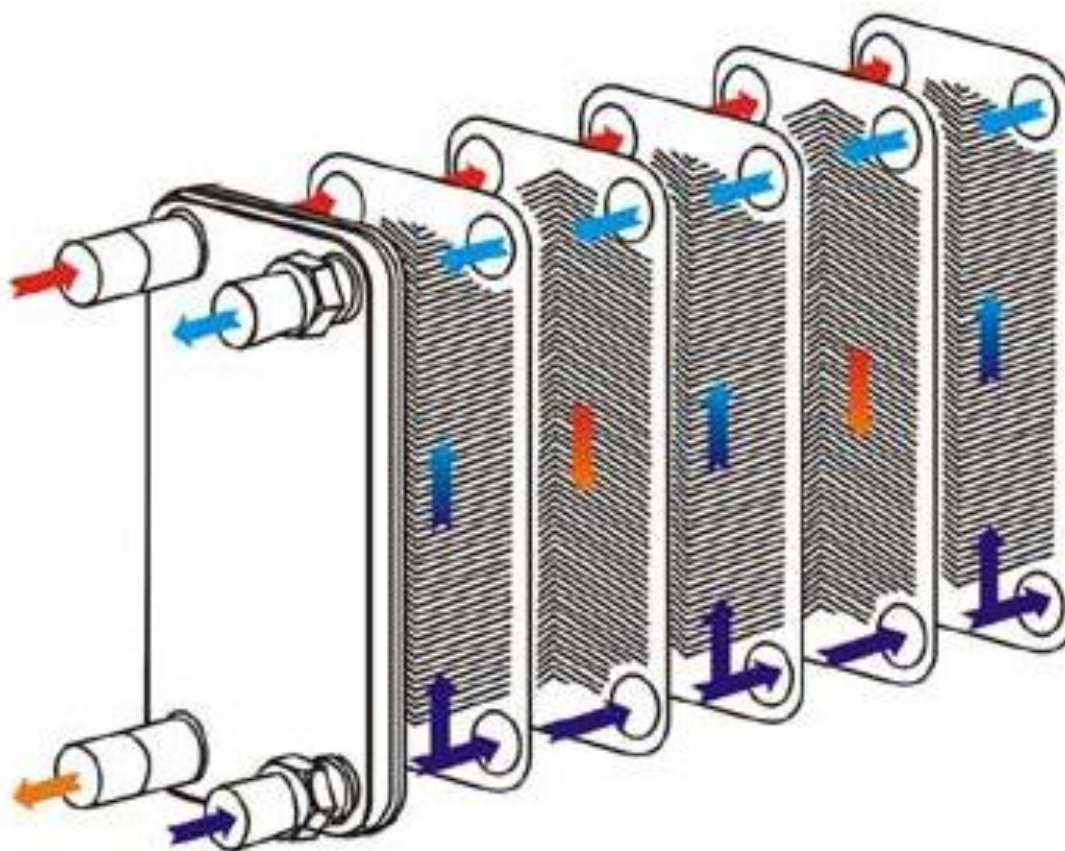
Druhá část je věnována elektrické a programové části, kde je návrh elektrický návrh celé stanice, propojení stanice s PLC automatem a návrh ovládacího programu PLC.

Ve třetí části je spočítán matematický model výměníku tepla, realizována simulace ve vývojovém prostředí Matlab Simulink a navržen regulátor metodou Ziegler-Nicholse.

# 1. TEORETICKÝ ÚVOD

## 1.1 Výměník tepla

Výměník tepla je zařízení, jehož primární funkcí je přenos tepla mezi médii. Podle způsobu provedení existuje mnoho typů, v této práci je použit deskový výměník tepla. Deskový výměník tepla se skládá z řady desek, které jsou k sobě stažené pomocí šroubů mezi hlavní a přítlačnou desku. Aby se docílilo vzniku dvou oddělených mezikomorových prostorů pro protékající média je každá z desek opatřena těsněním. Na obrázku 1.1 je vyobrazena konstrukce deskového výměníku tepla se znázorněním toku primárního a sekundárního média.



Obrázek 1.1 Deskový výměník tepla, zdroj [1]

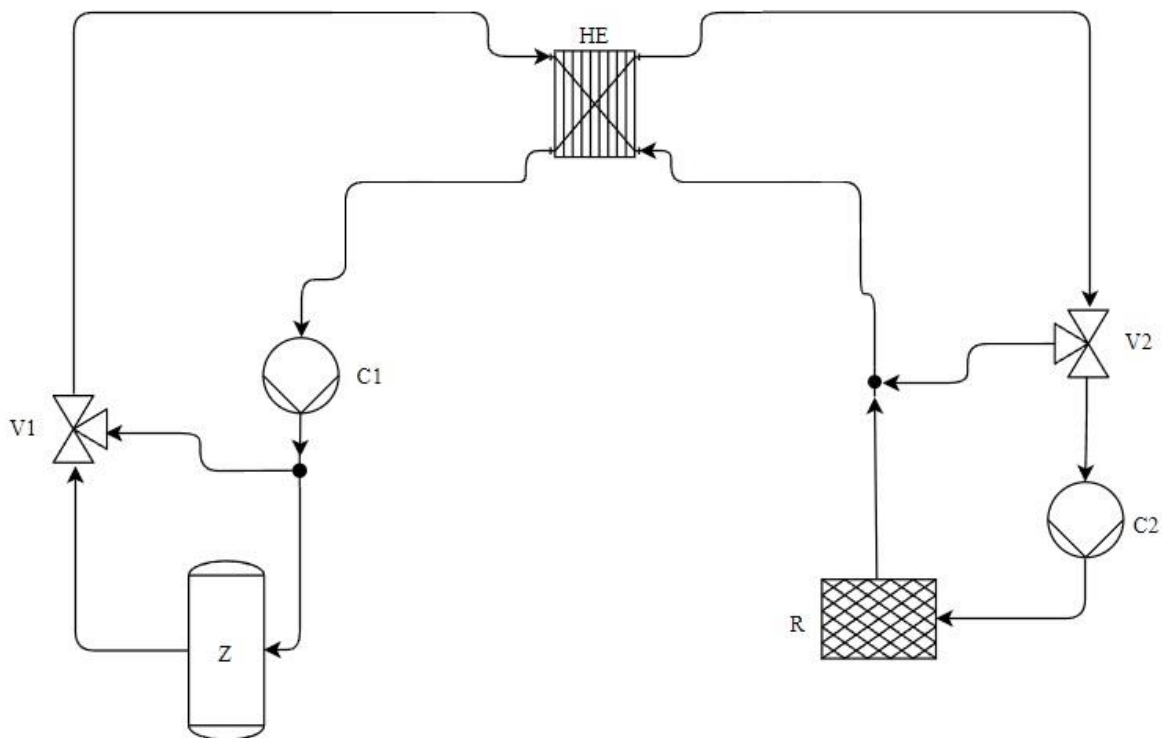
Výměníky lze podle pracovního média dělit do dvou skupin:

- Báze beze změny fáze (výměna tepla probíhá mezi stejnými médii)
- Se změnou fáze (výměna tepla probíhá mezi různými médii)

Typickým představitelem výměníku se změnou fáze jsou například radiátory, kde výměna tepla probíhá mezi vodou v radiátorech a okolním vzduchem.

## 1.2 Měřicí stanice

Na obrázku lze vidět dva hlavní okruhy vody. Primární okruh, který zahrnuje ohřev vody ve formě bojleru, přes výměník převádí teplo do sekundárního okruhu, který zahrnuje simulátor topného tělesa, kde se sekundární okruh vody ochlazuje. Oba okruhy obsahují teplotní snímače a průtokoměry. Vše je připojeno k ovládacímu prvku PLC přes sběrnici DB - 25. Ovládání je řešeno pomocí dotykového displeje HMI (Human machine interface), přes který uživatel dokáže ovládat všechny akční prvky.



Obrázek 1.2 Zjednodušené schéma systému měřicí stanice

kde		
Z	...	zdroj teplé vody
V1, V2	...	elektromagnetické ventily
C1, C2	...	čerpadla
R	...	tepelná zátěž
HE	...	výměník tepla



Obrázek 1.3 Měřící stanice s tepelným výměníkem

### 1.2.1 Čerpadlo

Jako zdroj pohonného mechanismu pro vodu v oběhu je použito elektronicky regulovatelné čerpadlo. Voda je v čerpadlu poháněna turbínou poháněnou motorem, která se točí příslušným směrem.



Obrázek 1.4 Čerpadlo pohánějící vodu ve stanici

V tomto konkrétním případě není čerpadlo nastaveno tak, aby se řídilo např. pulsní regulací. Pro použití v měřicí stanici je použité ovládání pouze na dva stavy – vypnuto/zapnuto. Neboli pokud je na vstup čerpadla přivedeno nulové napětí, je vypnuté. Pokud je na vstup přivedeno nenulové napájecí napětí, čerpadlo běží (je zapnuté).

Je nutné podotknout, že má čerpadlo i manuální nastavení výkonu (potenciometr na obrázku číslo 1.4). Pro úspěšné měření je nutné nemanipulovat s tímto potenciometrem, tedy aby čerpadlo při zapnutí běželo na plný výkon. To je z důvodu toho, že pro měření tepelného čerpadla není potřeba měnit rychlost tekoucí vody v potrubí. Hlavní veličinou je teplota v obou vodovodních potrubích.

### 1.2.2 Elektromagnetický ventil

Primární činností elektromagnetického ventilu je otevírání a zavírání přívodu vody do jednotlivých větví. Funguje na jednoduchém principu, který využívá elektromagnetu, jenž pohybuje částí, která blokuje přívod vody.

Volba vhodného elektromagnetického ventilu záleží na tlaku vody, který se nachází ve vodovodním systému. Zároveň je zde možnost neotevírat ventil pouze do dvou stavů (otevřeno/zavřeno), ale i nastavení ventilu na pouze částečné otevření, či zavření.

Elektromagnetický ventil použitý ve výměňkové stanici má z boku přidělaný externí pohon, který zajišťuje otevírání a zavírání ventilů.

Při nulovém napětí je ve stavu zavřeno, poté podle velikosti připojeného napětí je regulováno otevření ventilu. Ovládacím prvkem je PLC, ke kterému se ventil musí připojit na analogový výstup 0–10 V.



Obrázek 1.5 Elektromagnetický ventil

Podobně jako u čerpadla mají tyto elektromagnetické ventily i manuální ovládání otevření a zavření ventilů. Pro úspěšné měření se předpokládá ovládání elektromagnetického ventilu elektrickým signálem z řídicího prvku PLC.

### 1.2.3 Bojler

Jako zdroj tepla je v modelu použit elektrický bojler s konstantním napájecím napětím. Ohřev vody v bojleru spočívá na principu topného tělesa, který se nachází uvnitř tlakové nádoby.

Bojleru je ve výchozím stavu nastaven tak, aby při zapnutí začal ohřívat kapalinu, která se nachází uvnitř bojleru. Následně je rozhodnutí na uživateli, zdali k bojleru například zapojí čerpadlo, které by pohánělo vodu dovnitř a ven z čerpadla. To by znamenalo, že do bojleru by přicházela stále nová kapalina. Pokud by okruh nebyl uzavřen a ústí by například do vodovodní nádrže, tak je šance, že nastane situace, kdy se kapalina uvnitř bojleru nestihne ohřát na teplotu nastavenou na bojleru a opustí bojler s nižší teplotou, než která je uživatelem nastavená na bojleru. Z toho vyplývá, že bojler ohřívá kapalinu neustále. Tento jev závisí na velikosti nádrže bojleru a na rychlosti proudění kapaliny. Kdyby tato situace nenastala a buď by nádrž byla dostatečně velká nebo by rychlost proudění byla dostatečně malá poté, by bojler ohřál kapalinu v nádrži na nastavenou teplotu, následně by bojler vypnul ohřívání a čekal by na situaci kdy poklesne teplota. Jakmile by teplota klesla o určitý rozdíl, potom by se bojler opět zapnul a ohříval by kapalinu uvnitř své nádrže. Tento rozdíl je u každého bojleru jiný.

Bojler, který je použitý ve výměňkové měřicí stanici je zapojen tak, že na jeho ústí je trojcestný ventil, který reguluje množství ohřáté kapaliny distribuované do okruhu.

### 1.2.4 Průtokové snímače

V tomto případě jsou na měřicí aparatuře použity průtokové snímače s analogovým vyobrazením hodnot. Pro lepší zpětnou vazbu je možnost toto čidlo připojit k automatu a pomocí pulsního systému odesílat informaci o množství protékající kapaliny. Jeho primárním významem je kontrola, zdali je v okruhu stálá rychlost průtoku vody.

### 1.2.5 Teplotní snímače



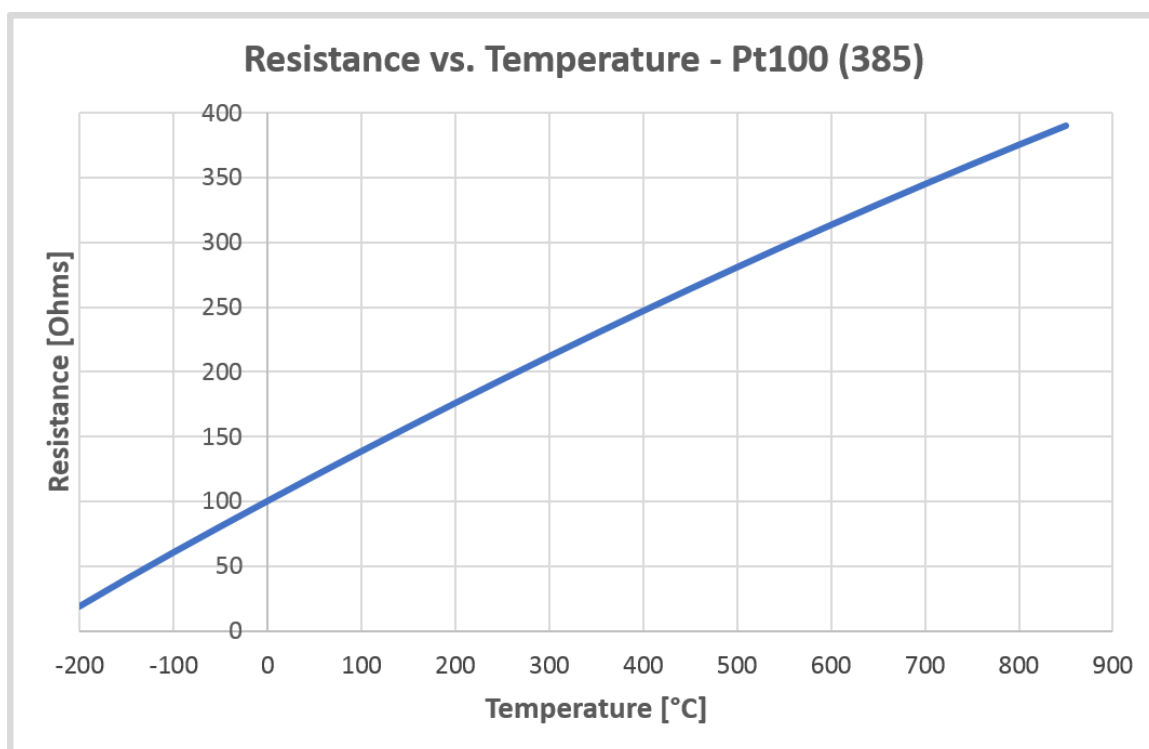
Obrázek 1.6 Teplotní snímač Pt100, zdroj [2]

V modelu jsou použity odporové teplotní snímače, konkrétně Pt100. Tento kovový snímač má v sobě navinutý platinový drátek, který funguje jako odpor. Při nulové teplotě má odpor  $R = 100 \Omega$ , proto je v názvu tohoto snímače uvedena hodnota 100.

$$R_T = R_0 \cdot (1 + \alpha_R \cdot \Delta\vartheta) \quad (1)$$

kde

$R_T$	...	výsledný odpor [ $\Omega$ ]
$R_0$	...	odpor při nulové teplotě [ $\Omega$ ]
$\alpha_R$	...	teplotní součinitel odporu
$\Delta\vartheta$	...	změna teploty [ $^{\circ}\text{C}$ ]



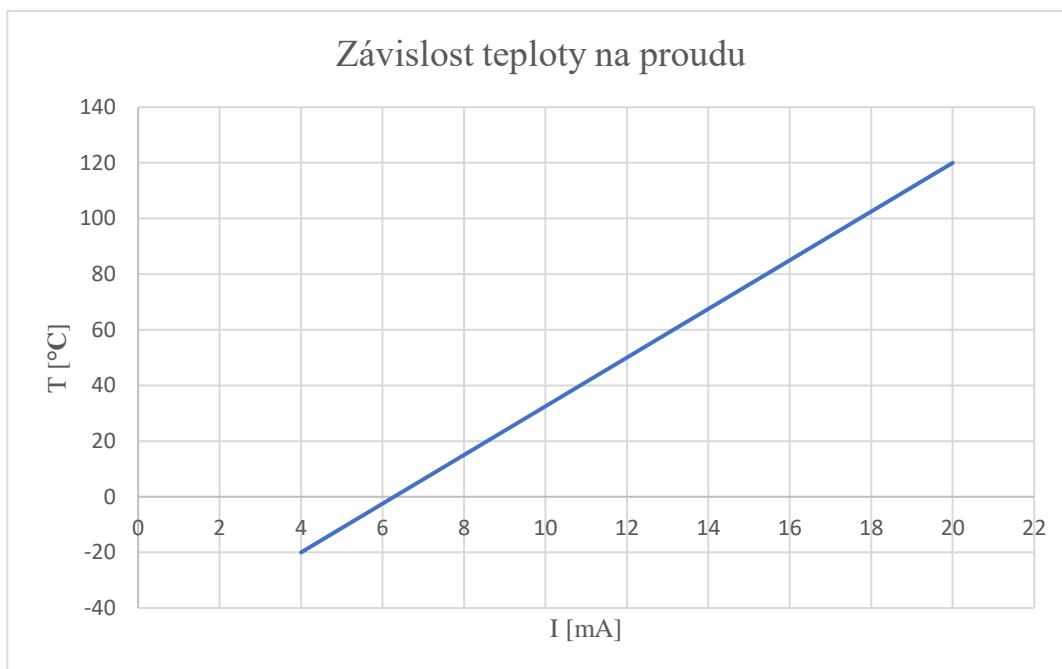
Obrázek 1.7 Závislost odporu na teplotě odporového snímače Pt100, zdroj [3]

Z grafu je vidět, že s rostoucí teplotou roste i odpor platinového vodiče. Toho se dá využít pro zjištění teploty média, se kterým přichází snímač do styku. Změřením odporu snímače a následným odečtením hodnoty z grafu závislosti snímače se dá zjistit teplota, kterou má aktuálně médium (v tomto konkrétním případě voda).

### 1.2.6 Standardizace měřené veličiny

Standardizace měřené veličiny je převod z veličiny, která je fyzikálně výstupem senzoru na veličinu, kterou reprezentuje. U termistorů použitých v měřicí stanici je fyzikální veličinou proud, jehož velikost reprezentuje teplotu na čidle.

Pokud by platilo, že měřicí rozsah proudu čidla je 4–20 mA a teplotní rozsah čidla je -20 až 120 °C, lze vynesemím do grafu získat převodní přímku.



Obrázek 1.8 Graf závislosti teploty na protékajícím proudu termistoru

Pro jednoduchý převod libovolné hodnoty proudu na teplotu je vhodné sestavit rovnici přímky:

$$t = a \cdot I - b \quad (2)$$

Pro výpočet neznámých  $a$  a  $b$  je nutné dosadit do této rovnice dva body, které leží na přímce (například maximální a minimální hodnoty obou veličin):

$$t_1 = a \cdot I_1 - b \quad (3)$$

$$t_2 = a \cdot I_2 - b \quad (4)$$

Výsledkem dosazení je soustava dvou rovnic o dvou neznámých. Po výpočtu této soustavy je výsledek neznámých  $a$  a  $b$  následující:

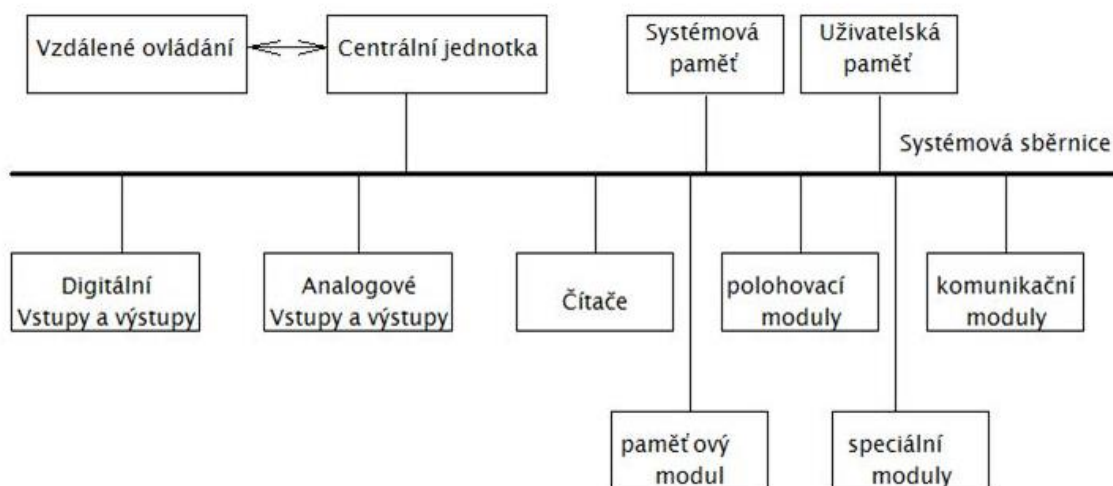
$$b = \frac{t_2 - t_1}{I_2 - I_1} \cdot I_1 - t_1 \quad (5)$$

$$a = \frac{t_2 - t_1}{I_2 - I_1} \quad (6)$$

### 1.3 PLC

PLC neboli Programovatelný logický automat je číslicový elektronický systém, navržený pro použití v průmyslovém prostředí, který využívá programovatelnou paměť pro uložení uživatelsky orientovaných instrukcí. Dá se programovat v programech jako např. TIA Portal, či Factory IO.

Tento automat slouží k implementaci specifických funkcí za účelem řízení strojů a procesů pomocí číslicových analogových vstupů i výstupů.



Obrázek 1.9 Blokové schéma PLC, zdroj [10]

### 1.3.1 Vstupy a výstupy PLC

Automaty použité v laboratoři automatizace S7 – 1500 typ 1512C – 1 PN disponují celkem 32 digitálními vstupy, 32 digitálními výstupy a 20 analogovými vstupy/výstupy. Pro zapojení měřicí stanice budou zejména důležité analogové vstupy, na které se připojí odporové snímače teploty, podle kterých lze pomocí otevření a zavírání elektromagnetických ventilů řídit teplotu vody. Dalším prvkem, který potřebuje analogový výstup je právě elektromagnetický ventil, které se dá nastavit nejen na plně otevřeno a zavřeno, ale i na například 50 % otevřeno. Ostatní prvky jako např. čerpadlo lze připojit na digitální výstupy, protože ke svému ovládacímu potřebují pouze stavy 1 a 0 (zapnuto a vypnuto).

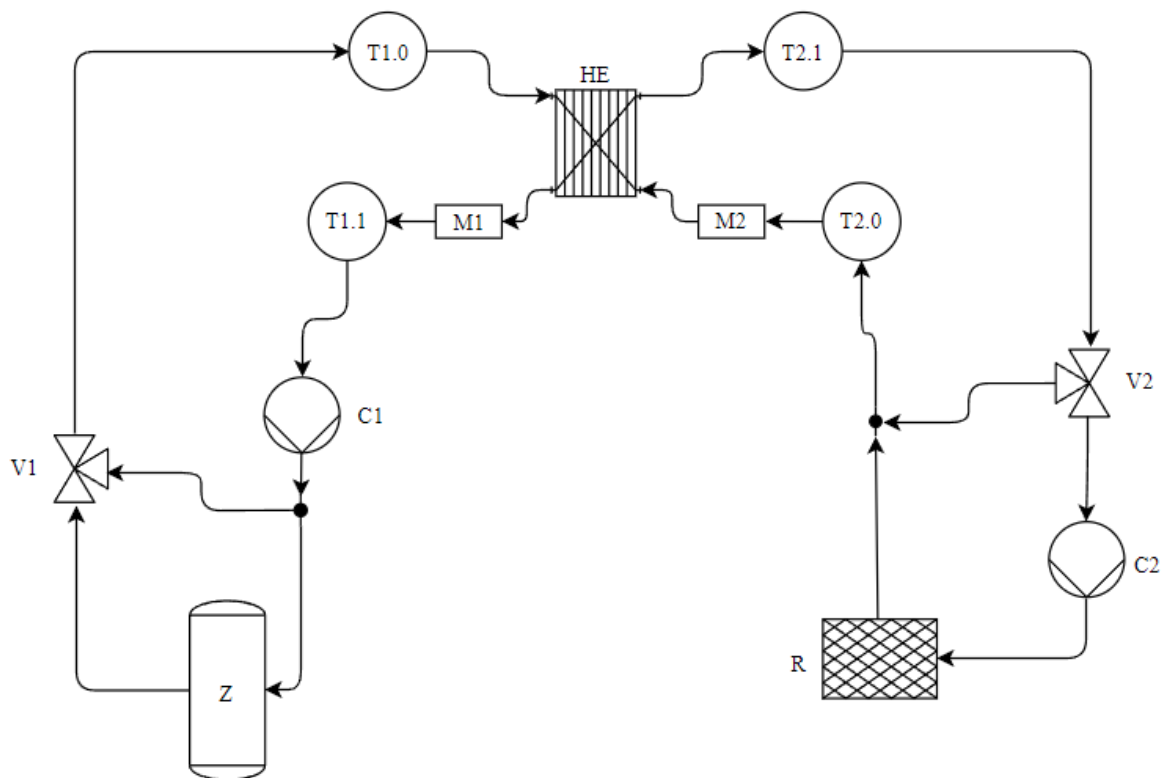
### 1.3.2 TIA Portal

TIA Portal (Totally integrated automation Portal) je použitý software pro nastavení ovládacího prvku PLC. Tento program umožňuje psát kód v různých jazycích (např. Ladder Diagram, nebo Structured Text) a konkrétní nastavení výstupů i vstupů PLC.

Tento software je oficiálně vydaným programem od firmy Siemens, která vytváří i samotná PLC. Jakožto licencovaný produkt firmy Siemens není tento program zdarma ke stažení, existuje pouze 21denní zkušební verze. Většinou bývá tento program distribuovaný společně se zakoupením PLC.

## 2. PRAKTICKÁ ČÁST – KONSTRUKCE STANICE

Celá stanice je navržena tak, aby se dokázaly co nejefektivněji demonstrovat fyzikální vlastnosti nejdůležitějšího prvku celé stanice – výměníku tepla. Ten je připojen mezi primární a sekundární okruh. Primární okruh je navržen tak, aby ohříval kapalinu a sekundární okruh tak, aby teplotu kapaliny snižoval. Oba okruhy obsahují trojcestné ventily, které slouží k regulaci jednotlivých ohřívacích a chladících prvků, čerpadla, která pohání kapalinu v potrubích a teploměry, pro zpětnou vazbu ve formě teploty kapaliny v jednotlivých částech okruhů.



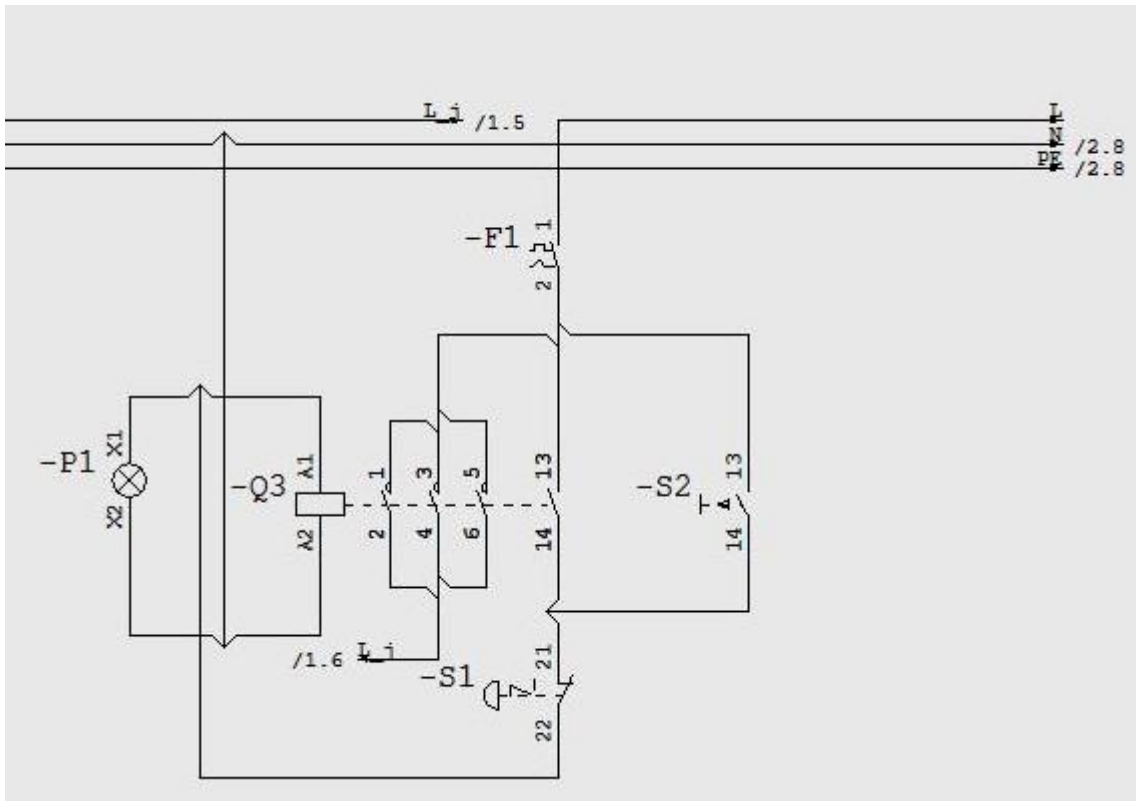
Obrázek 2.1 Blokové schéma systému měřicí stanice

kde		
Z	...	zdroj teplé vody
V1, V2	...	elektromagnetické ventily
C1, C2	...	čerpadla
R	...	tepelná zátěž
HE	...	výměník tepla
M1, M2	...	průtokoměry
T1.0, T1.1, T2.0, T2.1	...	teplotní čidla

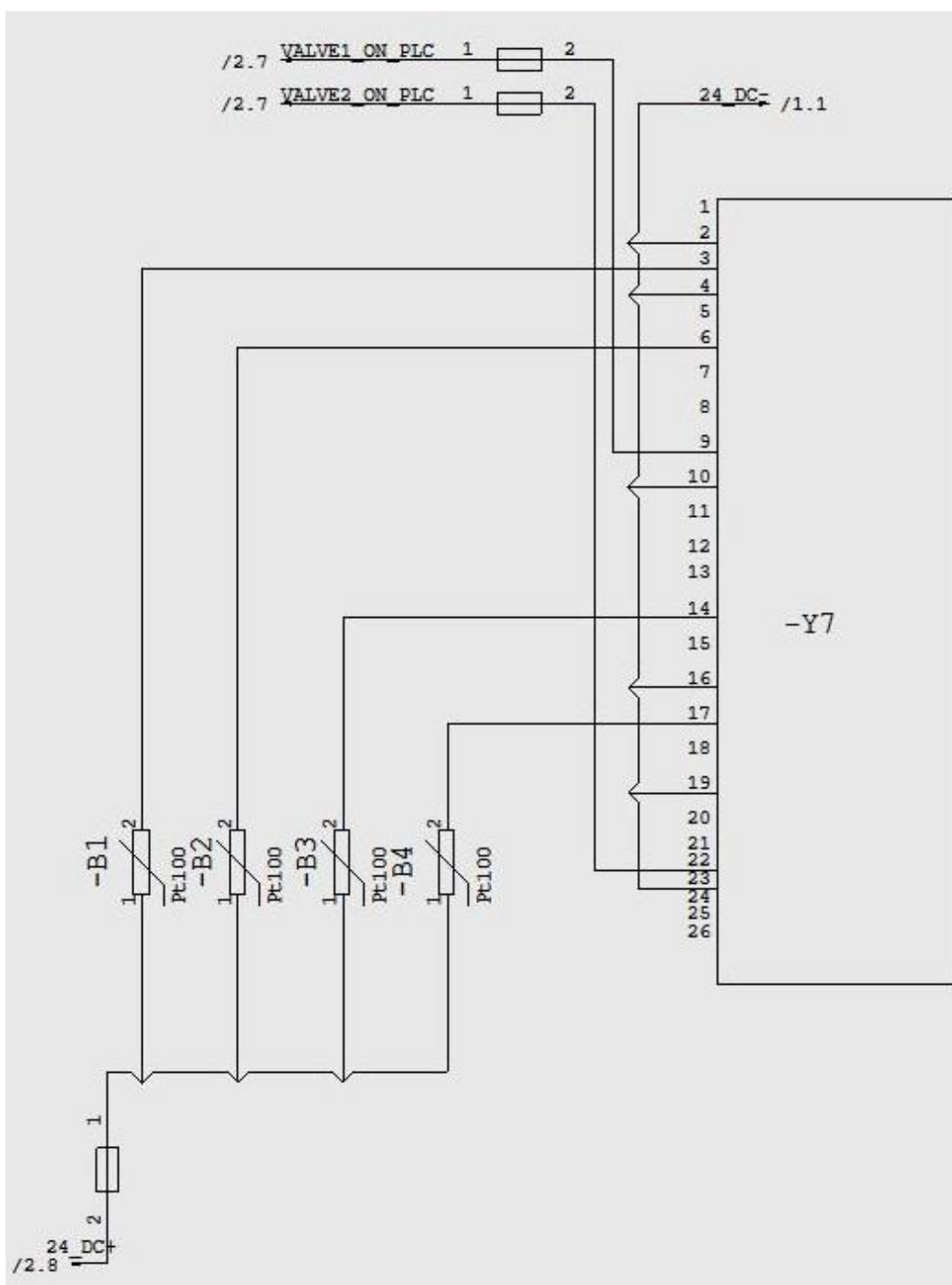
## 2.1 Elektrické schéma zapojení

V prvé řadě bylo potřeba navrhnout elektrické schéma pro připojení jednotlivých prvků do elektrické sítě. Pro tyto účely byl nejprve navržen ochranný obvod, který obsahuje hlavní jistič a tlačítka pro zapnutí nebo nouzové vypnutí celé stanice. Dále stykače, pro spínání boileru a čerpadel, relé, která spínají ovládací cívky stykačů, transformátor a stejnosměrný zdroj na 24 V.

Pro návrh elektrického schématu bylo použito vývojové prostředí WS-CAD.



Obrázek 2.2 Ochranný obvod pro zapnutí a nouzové vypnutí stanice



Obrázek 2.3 Ukázka zapojení teploměrů a sběrnice DB - 25

Kompletní zapojení celé výměňkové stanice obsahuje příloha L, tabulka všech použitých součástí v zapojení se nachází v příloze G.

## 2.2 Montáž

Druhým krokem ke zprovoznění stanice bylo zapojení všech zařízení podle navržených schémat. Dle schémata zapojení byl spočítaný počet součástek, které byly následně rozmístěny v rozvaděči. Za účelem propojení součástek byly nastříhány vlastní propojovací kabely. Tyto kabely byly upraveny na správnou délku a na jejich konce byly přidány kabelové zakončovací dutinky. Poté následovalo samotné propojení součástek pomocí upravených kabelů.

Po dokončení zapojení prošel systém řadou kontrol. Byla kontrolována funkčnost ochranného okruhu, který slouží k nouzovému vypnutí celé stanice pomocí červeného stop tlačítka umístěného na dobře viditelném a přístupném místě. Dále spínání jednotlivých relé členů a stykačů. Rozvaděč byl pro finální kontrolu proměřen multimetrem.

Při testování funkčnosti jednotlivých akčních prvků byl objeven problém s čerpadly. Byla zjištěná závada na obou čerpadlech, která při sepnutí ovládacích stykačů nefungovala. Příčinou nefunkčnosti čerpadel byl usazený vodní kámen, který se za léta nepoužívání měřicí stanice usadil v čerpadlech a bránil jim v zapnutí. Tento problém byl vyřešen tím, že se každé čerpadlo rozebralo a vyčistilo od nečistot. Po vyčištění čerpadla již fungovala správně.

Po odstranění tohoto problému výměňiková stanice fungovala dle očekávání.

## 2.3 TIA portál

Ke správné funkčnosti stanice je třeba napsat program pro ovládání automatu, inicializaci vstupů a výstupů a propojení s dotykovou obrazovkou (HMI). Hlavní program byl napsán v mainu s výjimkou funkčních bloků, sloužící pro přepočítání hodnoty ze senzorů na teplotu. Inicializace vstupů a výstupů je nastavena v bloku Device configuration a dotyková obrazovka v HMI.

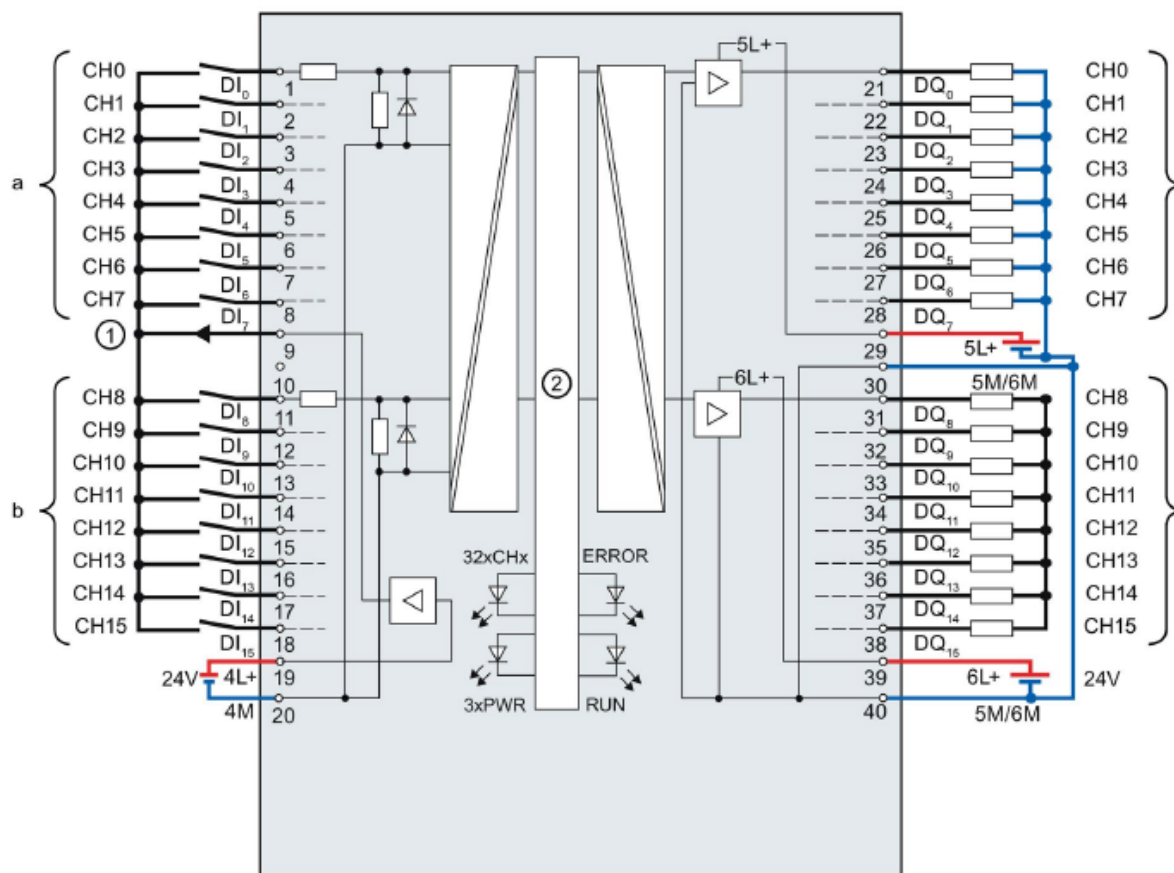
### 2.3.1 Device configuration

V položce Device configuration se nachází nastavení vstupů a výstupů všech dostupných karet automatu. Karty je třeba zvolit správně, protože některé karty mají k dispozici pouze digitální vstupy nebo výstupy a některé pouze analogové vstupy a výstupy.

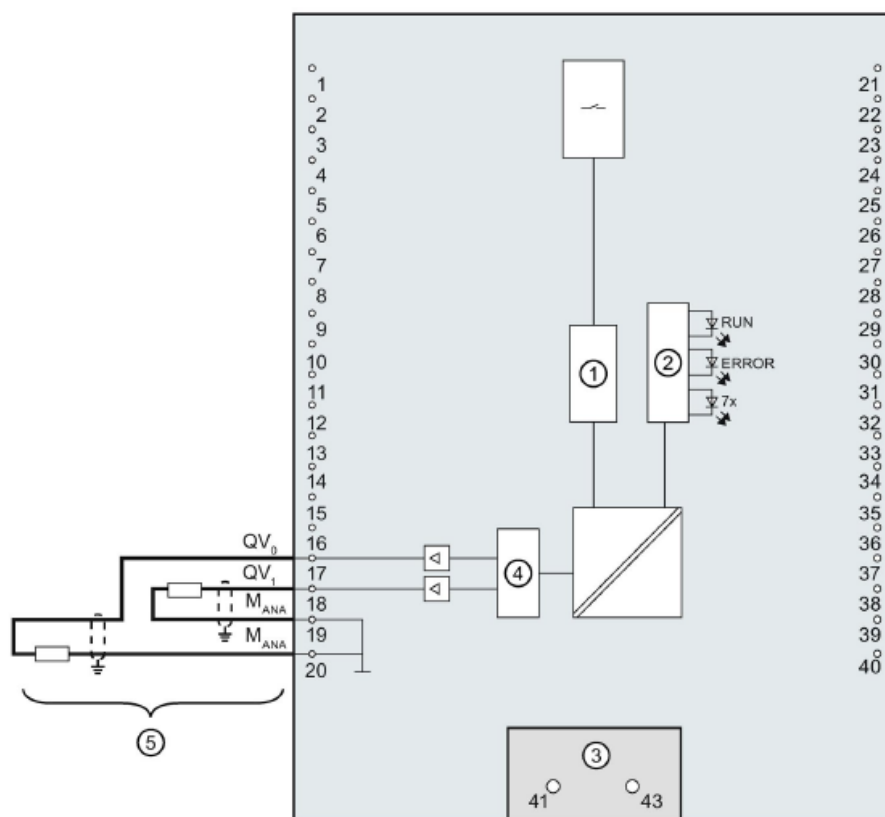
Tabulka 2.1 Přehled proměnných

Popis proměnné	Proměnná	Vstup/Výstup	Digitální/Analogová
Ovládání boileru	boiler_ON	Výstup	Digitální
Ovládání čerpadla 1	pump_1	Výstup	Digitální
Ovládání čerpadla 2	pump_2	Výstup	Digitální
Červené tlačítko	btn0_1	Vstup	Digitální
Oranžové tlačítko	btn1_1	Vstup	Digitální
Zelené tlačítko	btn2_1	Vstup	Digitální
Červená LED	red	Výstup	Digitální
Oranžová LED	orange	Výstup	Digitální
Zelená LED	green	Výstup	Digitální
Ovládání ventilu 1	valve1	Výstup	Analogová
Ovládání ventilu 2	valve2	Výstup	Analogová
Termistor 1.0	temperature_0	Vstup	Analogová
Termistor 2.1	temperature_1	Vstup	Analogová
Termistor 2.0	temperature_2	Vstup	Analogová
Termistor 1.1	temperature_3	Vstup	Analogová

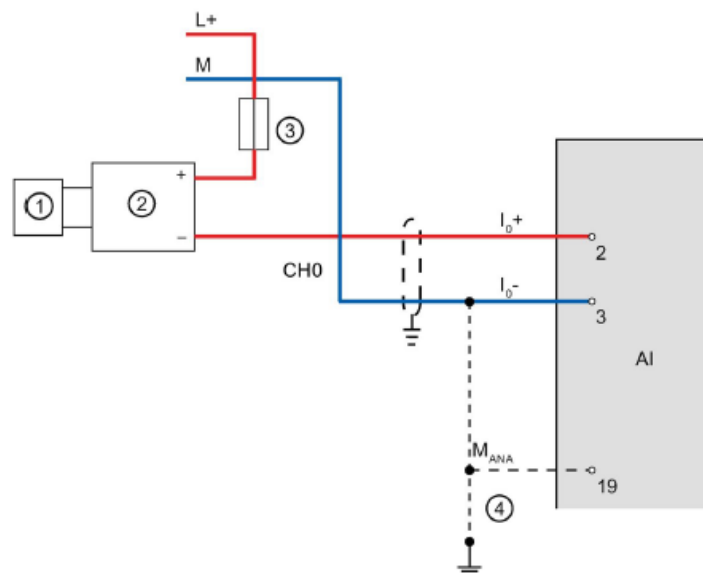
K zapojení je zapotřebí dvou karet, jedné, která má k dispozici digitální vstupy i výstupy a druhé která má k dispozici analogové vstupy a výstupy. U termistorů je nutné nastavit analogové vstupy jako 4wire-measure a signál jako 4-20 mA.



Obrázek 2.4 Ukázka zapojení digitálních vstupů a výstupů, zdroj [11]

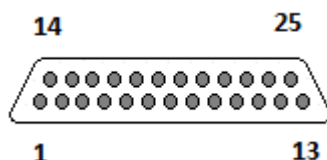


Obrázek 2.5 Ukázka zapojení analogových výstupů, zdroj [11]



Obrázek 2.6 Ukázka zapojení termistorů, zdroj [11]

U automatů použitých v laboratoři T12/SE 2.133 jsou vstupy a výstupy karet vyvedeny na sběrnice DB – 25. Pomocí tabulky je potřeba převést piny z čísla pinu na kartě na číslo pinu na sběrnici. Tento převod byl proveden pomocí tabulek **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** a **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**, které jsou uvedeny v příloze C.



Obrázek 2.7 Očíslování pinů na konektorech

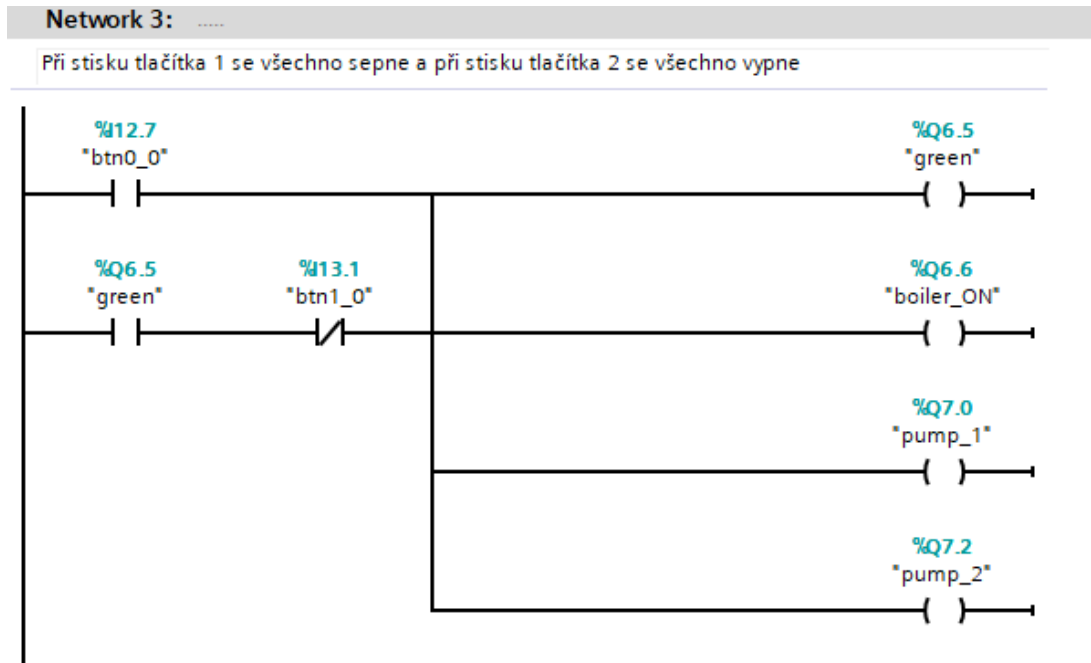
Pro každý signál vedoucí dovnitř nebo ven z PLC je nutné použít správné zapojení. Pro každý typ signálu má PLC automat určité zapojení, což lze vidět na obrázcích 2.4, 2.5 a 2.6. Signály digitálních typů jsou zapojeny podle schématu na obrázku 2.4. Řídící signál pro elektromagnetické ventily jsou zapojeny podle schématu na obrázku 2.5 a termistory podle schématu na obrázku 2.6. Číselné označení konektorů na kartě, které lze vidět na obrázcích 2.4, 2.5 a 2.6 je nutné převést na adekvátní číselné označení pinů konektoru DB-25. Tento převod obsahuje tabulka 2.2.

Tabulka 2.2 Přiřazení proměnných k jednotlivým vstupům a výstupům

Proměnná	Karta	Číslo svorky (karta)	Číslo pinu (konektor)
boiler_ON	DI/DO 2	27	7
pump_1	DI/DO 2	31	8
pump_2	DI/DO 2	33	9
btn0_1	DI/DO 2	8	2
btn1_1	DI/DO 2	12	3
btn2_1	DI/DO 2	14	4
red	DI/DO 2	26	19
orange	DI/DO 2	28	20
green	DI/DO 2	32	21
valve1	AI/AO	17	9
valve2	AI/AO	18	22
temperature_0	AI/AO	5	3
temperature_1	AI/AO	11	6
temperature_2	AI/AO	2	14
temperature_3	AI/AO	8	17

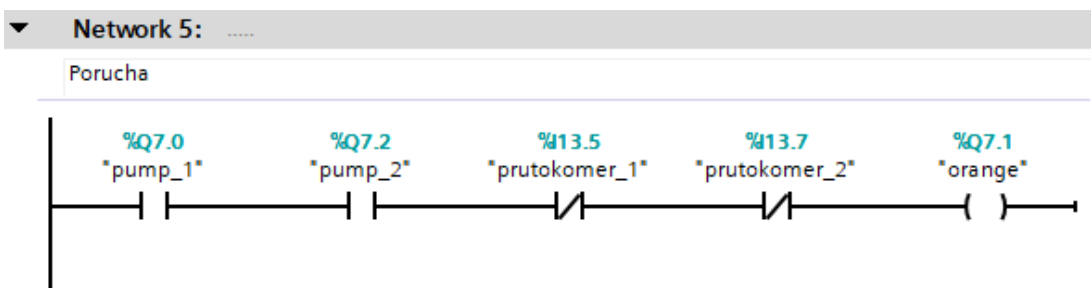
### 2.3.2 Hlavní program – main

Cílem hlavního programu je realizace ovládání stanice pomocí připojených tlačítek, nastavení záznamu měření a standardizace měřené veličiny (teploty).



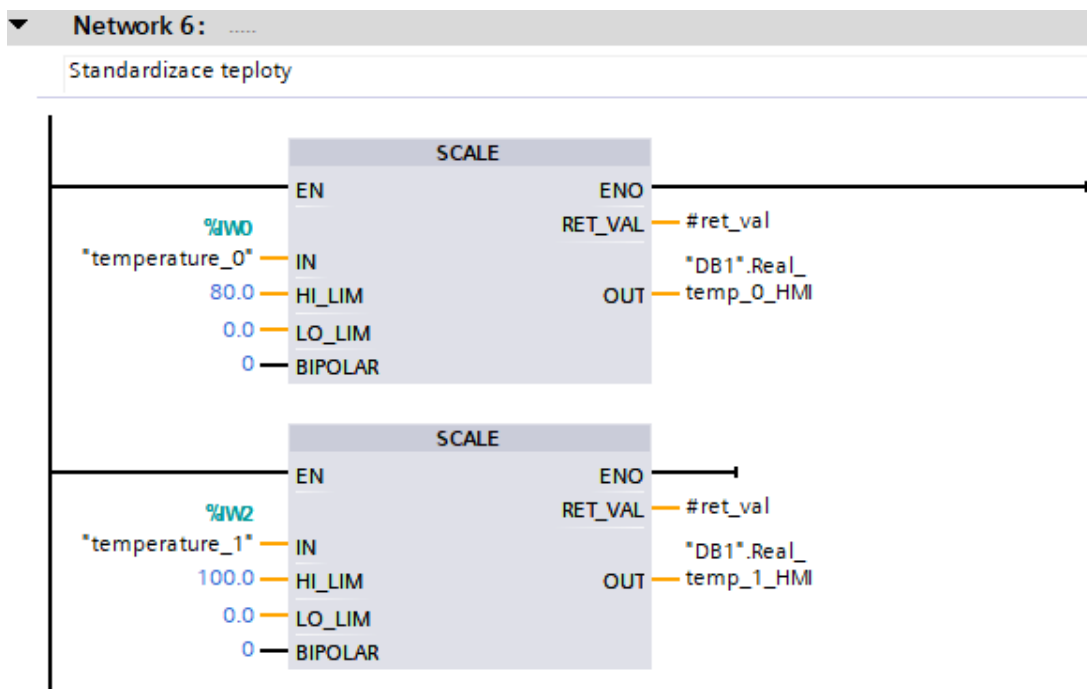
Obrázek 2.8 Spínání a rozepínání hlavních akčních prvků pomocí tlačítek

Na obrázku 2.8 lze vidět zapojení tlačítek. Funkce této části programu je taková, že při stisku zeleného tlačítka, program přenastaví řídicí signály zelené led diody tlačítka, bojleru a obou čerpadel na hodnotu 1. Je zde přidáno červené tlačítko, které při stisku všechny proměnné vynuluje.

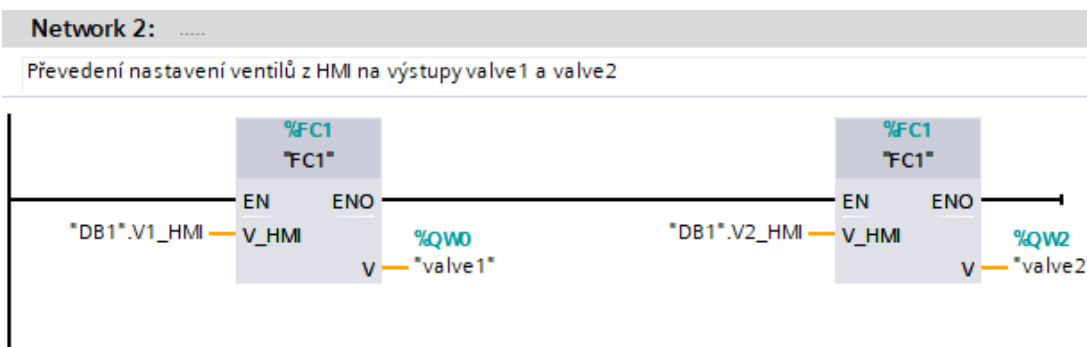


Obrázek 2.9 Rozsvícení oranžové LED

Obrázek 2.9 znázorňuje podmínku pro rozsvícení oranžové led diody – stav poruchy. Pokud jsou řídicí signály nastaveny do stavu zapnuto, ale průtokoměry neregistrují průtok kapaliny, potom se rozsvítí oranžová led, která informuje uživatele o skutečnosti, že je v měřící stanici porucha.



Obrázek 2.10 Standardizace měřené veličiny



Obrázek 2.11 Nastavení proměnných valve1 a valve2 pomocí bloku FC1

```

1 IF (#V_HMI > 100.0) THEN
2     #V := 27648;
3 ELSIF #V_HMI < 0.0 THEN
4     #V := 0;
5 ELSE
6     #V := REAL_TO_INT(#V_HMI / 100.0 * 27648.0);
7 END_IF;

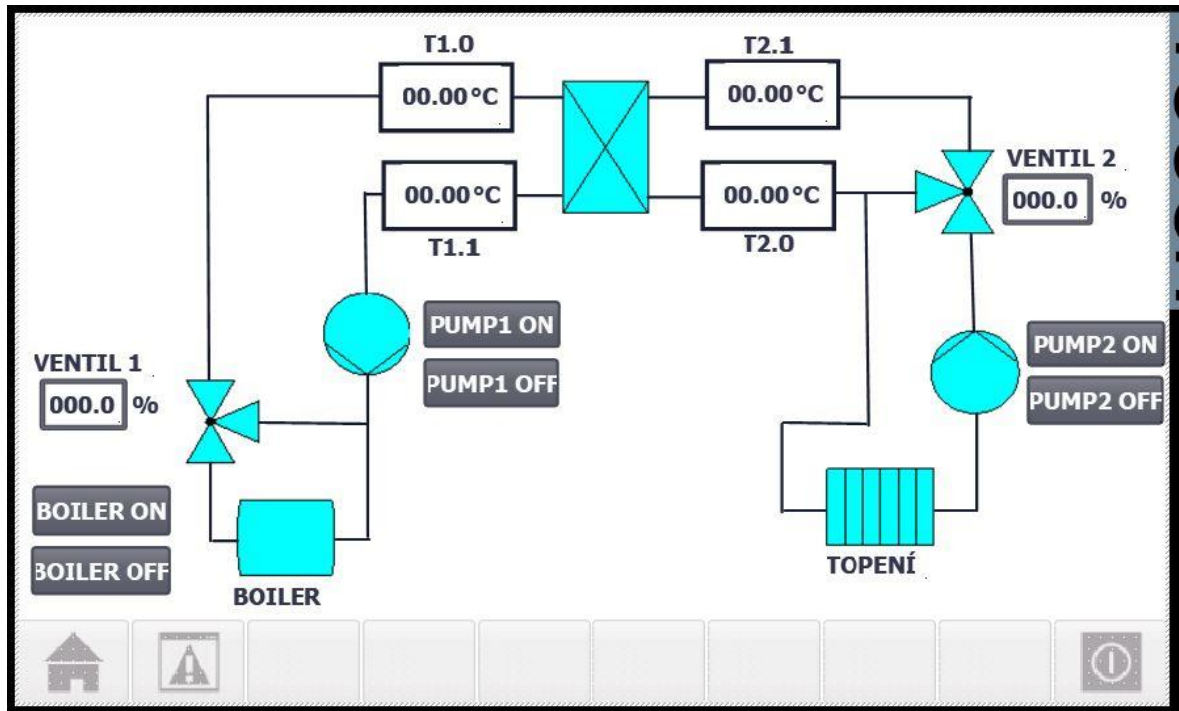
```

Obrázek 2.12 Funkční blok FC1

Na obrázcích 2.11 a 2.12 je znázorněn program, pro nastavování obou elektromagnetických ventilů. Předpokládaná vstupní veličina je v procentech, zatímco výstupní veličina, která ovládá elektromagnetické ventily je napětí. Převod procentuální hodnoty na hodnotu, která reprezentuje napětí je realizovaná pomocí bloku FC1.

### 2.3.3 HMI

Primární funkcí HMI panelu (Human Machine Interface panel) je ovládání hlavních akčních členů stanice.



Obrázek 2.13 HMI panel

Tlačítka Boiler ON a Boiler OFF slouží k vypínání a zapínání bojleru. Tlačítka Pump ON a Pump OFF jsou zde za účelem zapnutí a vypnutí čerpadel. Zároveň se na HMI panelu nacházejí dvě pole, která slouží zadávání hodnot. Jsou to konkrétně Ventil 1 a Ventil 2. Tyto pole slouží k nastavení trojcestných ventilů ve stanici. Dále jsou zde čtyři zobrazovací pole, která zobrazují aktuální měřenou teplotu v potrubích.

Celý HMI panel je ilustrován tak, aby usnadnil uživateli práci s ovládáním stanice a s hledáním umístění teplot v měřicím okruhu.

## 2.4 Měření

Cílem měření je zjistit důležité parametry pro návrh matematického modelu. Konkrétně je to časová a převodní konstanta výměníku tepla.

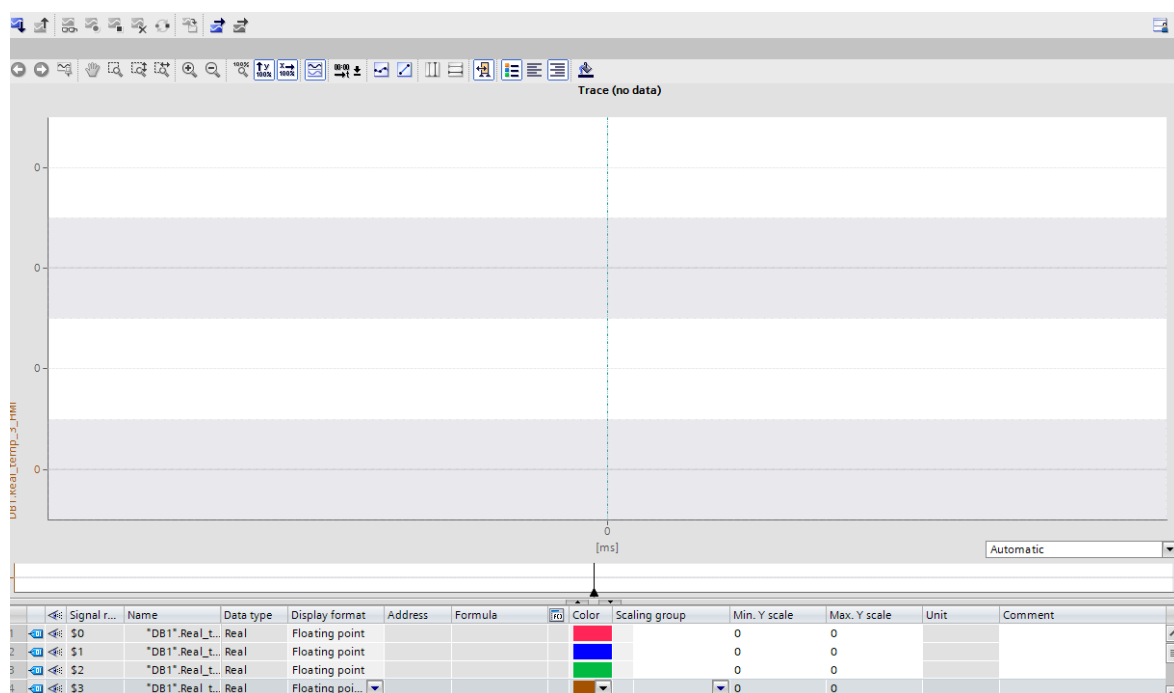
### **2.4.1 Příprava stanice před měřením – uvedení do provozu**

Před začátkem měření na výměňkové stanici je nutné provést řadu kroků a uvést tím stanici do stavu kdy je připravena k měření. V první řadě je nutné zjistit, jestli je ve stanici voda. Pokud není je nezbytné napustit oba měřicí okruhy vodou. K tomuto účelu jsou k oběma okruhům přidělané mechanické ventily. Při napouštění stačí k libovolnému mechanickému ventilu připevnit hadici, která je na druhém konci připevněna ke zdroji vody. Pokud je hadice upevněna jak ke zdroji vody, tak k měřicímu okruhu lze otevřít přívod vody do okruhu. Zatímco se voda napouští je potřeba sledovat analogové tlakoměry a zároveň povolit šroubovákem upouštěcí ventil pro vzduch, který je umístěn v horní části okruhu. Pro zajištění co nejpřesnějšího měření je nezbytné, aby se uvnitř okruhu nacházelo co nejméně vzduchu, v ideálním případě, aby se uvnitř okruhu žádný vzduch nevyškytoval. Pomocí tlakoměru, lze vypnutím přívodu vody nastavit požadovaný tlak v okruhu. Jakmile se nastaví požadovaný tlak v okruhu, a zároveň se v okruhu vyskytuje minimální množství vzduchu lze přívod vody vypnout. Poté zavřít mechanický ventil, kterým se napouštěla voda a odpojení napouštěcí hadice. Tento postup je nutné zopakovat i pro druhý měřicí okruh. Po napouštění obou okruhů vodou je potřeba vizuálně zkontrolovat, zdali voda nevytekla vně okruh. Stanice se v žádném případě nesmí zapojit do elektrické sítě, pokud se voda nachází vně měřicí okruhy. V tom případě by hrozilo vážné riziko bezpečnosti celé měřicí stanice.

Pokud jsou oba okruhy napuštěny vodou, je měřicí stanice připravena k zapojení do elektrické sítě.

### **2.4.2 Záznam dat**

Pro záznam hodnot lze v programu TIA Portal využít blok *Traces*, který inicializuje záznam hodnot proměnných, které jsou definovány na obrázku 2.14 v dolní části modulu Trace.



Obrázek 2.14 Blok Traces

Proměnné jsou definovány jako typ real s odlišnými barvami. Jako další parametr, který je potřeba stanovit je perioda vzorkování. To je realizováno přidáním blokem *Cyclic interrupt[OB30]*, který má nastavený delay 1000 ms.

Na začátku a konci měření se musí manuálně zapnout a vypnout záznam měření. Výsledné data je možné importovat do souboru s příponou .csv, který umožňuje snadnou manipulaci s daty například ve vývojovém prostředí Matlab.

### 2.4.3 Postup měření

Pro validní výsledek měření je vhodné, aby v primárním i sekundárním okruhu byl stejný tlak vody. Pracovní tlak byl zvolen jako 80 kPa. Dalším důležitým parametrem je teplota v místnosti kde měření probíhá. Pro správnou funkci topného tělesa je nutné, aby teplota vody uvnitř sekundárního okruhu byla vyšší než teplota vzduchu v místnosti. Pokud by tomu tak nebylo, voda by se v sekundárním okruhu namísto ochlazování ohřívala, což je jev, který je pro funkci topného tělesa nežádoucí.

Prvním krokem při měření je zapnutí stanice a nastavení teploty v primárním i sekundárním okruhu do výchozího stavu. Ventil V1 je nastaven do stavu kdy 100% vody v primárním okruhu poteče přes boiler. Ventil V2 je nastaven do stavu kdy žádná voda neteče do topného tělesa, aby se teplo v sekundárním okruhu neztrácelo.

Zároveň se zapnutím stanice je manuálně spuštěn záznam hodnot, pomocí kterého lze sledovat zvýšení teploty v primárním okruhu a čas za který se teplota v sekundárním okruhu vyrovná teplotě v primárním okruhu. Po ustálení teplot v primárním i sekundárním okruhu lze přejít ke druhému kroku měření.

Druhým krokem je nastavení obou ventilů do 60% otevření. Ventil V1 je nastaven tak aby boiler do měřícího okruhu dodával teplou vodu, která se smíchává s chladnější vodou v okruhu a ventil V2 tak, aby voda v sekundárním okruhu proudila přes topné těleso. Teplota se v sekundárním okruhu začne snižovat kvůli průchodu vody přes topné těleso. Ze záznamu hodnot lze sledovat čas za který se teplota v primárním okruhu nejprve začne snižovat a poté se ustálí na stejné hodnotě teploty jako v sekundárním okruhu.

Pomocí tohoto měření lze vypočítat časovou konstantu i převodní konstantu výměníku tepla.

#### **2.4.4 Výsledek měření**

Výsledek měření je zpracován v kapitole 3.3 – Regulace.

## 3. PRAKTICKÁ ČÁST – VÝPOČTY A SIMULACE

### 3.1 Matematický model výměníku tepla

Za účelem vhodného nastavení simulace bylo potřeba sestavit matematický model výměníku tepla, který popisuje funkce skutečného výměníku tepla.

Jedná se o termodynamický systém typu MIMO (Multi Input – Multi Output). Má dvě vstupní veličiny ( $T_{1.0}$ ,  $T_{2.0}$ ) a dvě výstupní veličiny ( $T_{1.1}$ ,  $T_{2.1}$ ). Mezi těmito veličinami platí vztah:

$$T_{2.1} = k \cdot (T_{1.0} - T_{1.1}) + T_{2.0}; \quad 0 \leq k \leq 1 \quad (7)$$

Konstanta  $k$  rozhoduje o účinnosti výměníku tepla, která závisí na rychlosti proudění kapaliny a na ztrátách teploty na zařízení.

Pokud je v primárním okruhu vyšší teplota kapaliny, než v sekundárním okruhu potom musí platit:

$$T_{2.1} > T_{2.0}, \quad (8)$$

$$T_{1.0} > T_{1.1} \quad (9)$$

Sekundární okruh přijímá teplo z primárního okruhu, tudíž musí mít kapalina na výstupu sekundárního okruhu výměníku tepla vyšší teplotu nežli kapalina na vstupu sekundárního okruhu výměníku tepla.

Pokud má kapalina v sekundárním okruhu vyšší teplotu, než kapalina v primárním je situace opačná:

$$T_{2.1} < T_{2.0}, \quad (10)$$

$$T_{1.0} < T_{1.1} \quad (11)$$

### 3.2 Simulace ve vývojovém prostředí MATLAB SIMULINK

Ve vývojovém prostředí Matlab Simulink byla provedena implementace dynamického modelu soustavy. Na začátku si bylo potřeba uvědomit, jaký má každý prvek v systému funkci a nahradit ho v simulaci vhodným způsobem.

Bojler, jakožto konstantní zdroj teplé vody byl realizován jako konstanta, která nastavuje požadovanou teplotu vody v bojleru. Elektromagnetické ventily byly prozatím nahrazeny sčítacími bloky. Jako náhrada za výměník tepla byly použity 4 bloky, které postupně násobí konstantou signál a jsou propojené mezi jednotlivými okruhy (viz obrázek číslo 3.1).

Náhrada samotného potrubí byla řešena zpětnovazebním systémem 1. řádu. Vzhledem k tomu, že voda cestuje v potrubí, tak nelze předpokládat, že to, co se objeví na vstupu se

ihned objeví na výstupu. Proto musí systém pomalu narůstat, což splňuje přechodová charakteristika zpětnovazebního systému 1. řádu:

$$F(p) = \frac{1}{T \cdot p + 1} \quad (12)$$

kde

$T$  ... časová konstanta

Parametry dynamické soustavy:

$$B = 0,45$$

$$T = 3$$

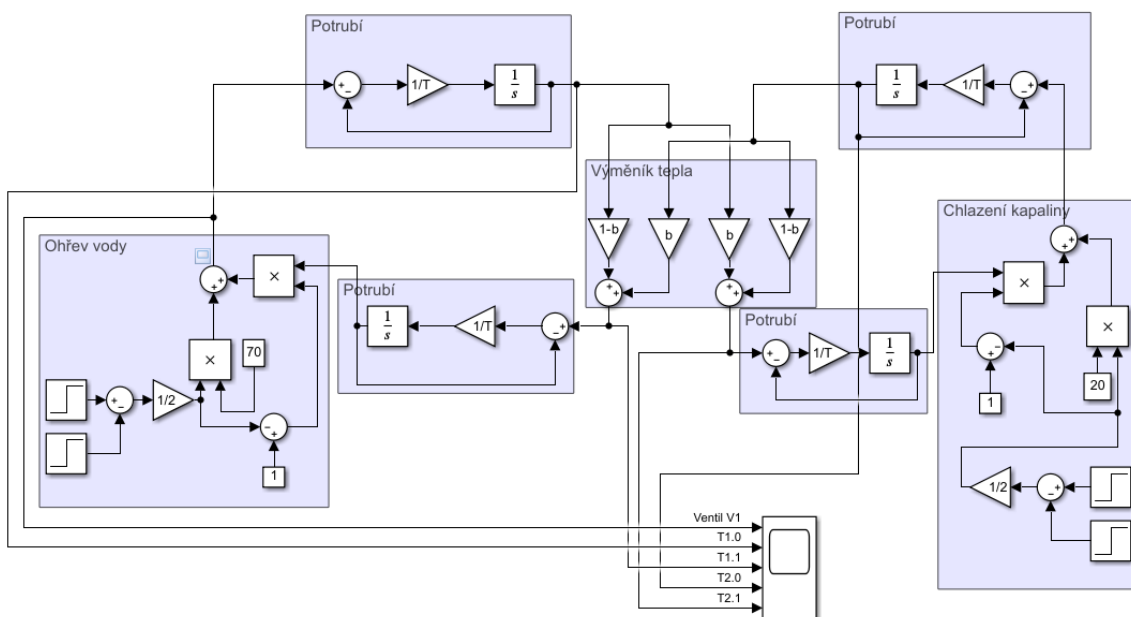
Pro usnadnění práce se simulací je namísto parametru  $k$  zvolen parametr  $B$ , který rovněž rozhoduje o účinnosti výměníku. Pro tento parametr platí vztahy

$$B = 2 \cdot k \quad (13)$$

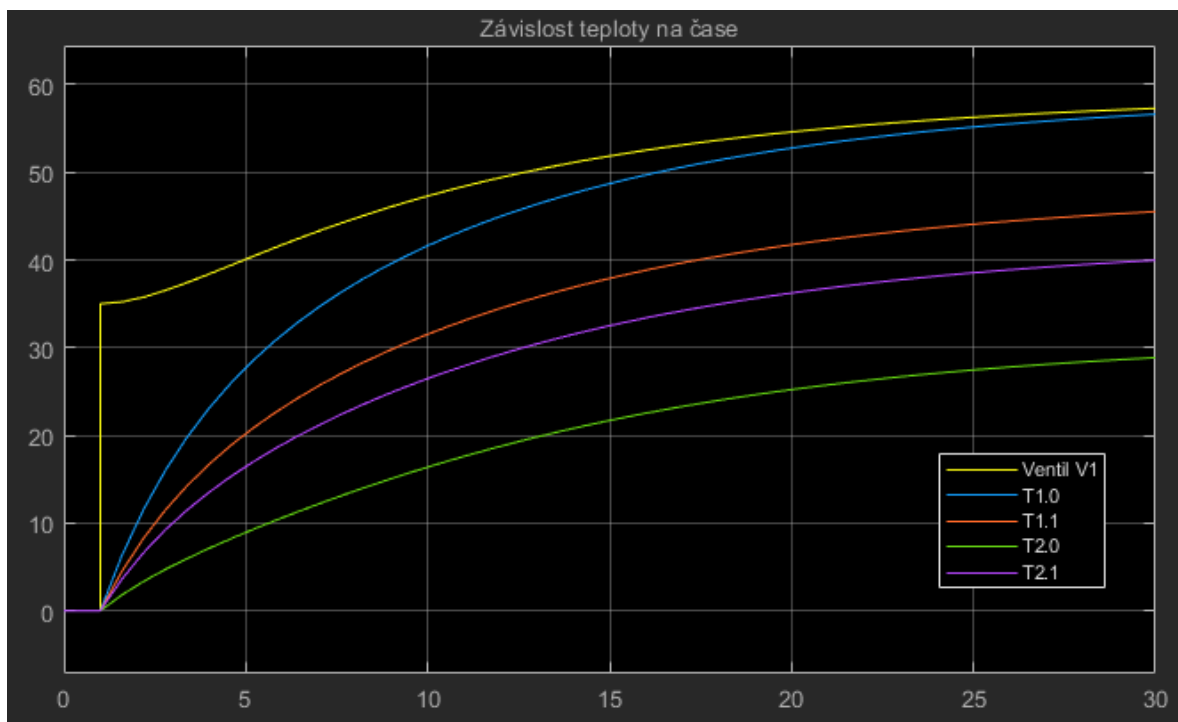
$$0 < B < \frac{1}{2} \quad (14)$$

Pokud se parametr  $B$  blíží k nule, je funkce výměníku skoro nulová, nepřenáší žádné teplo.

Naopak pokud se blíží k  $\frac{1}{2}$  je funkce výměníků naprosto ideální, tudíž veškeré teplo, co přijde z prvního okruhu se odevzdá do druhého.



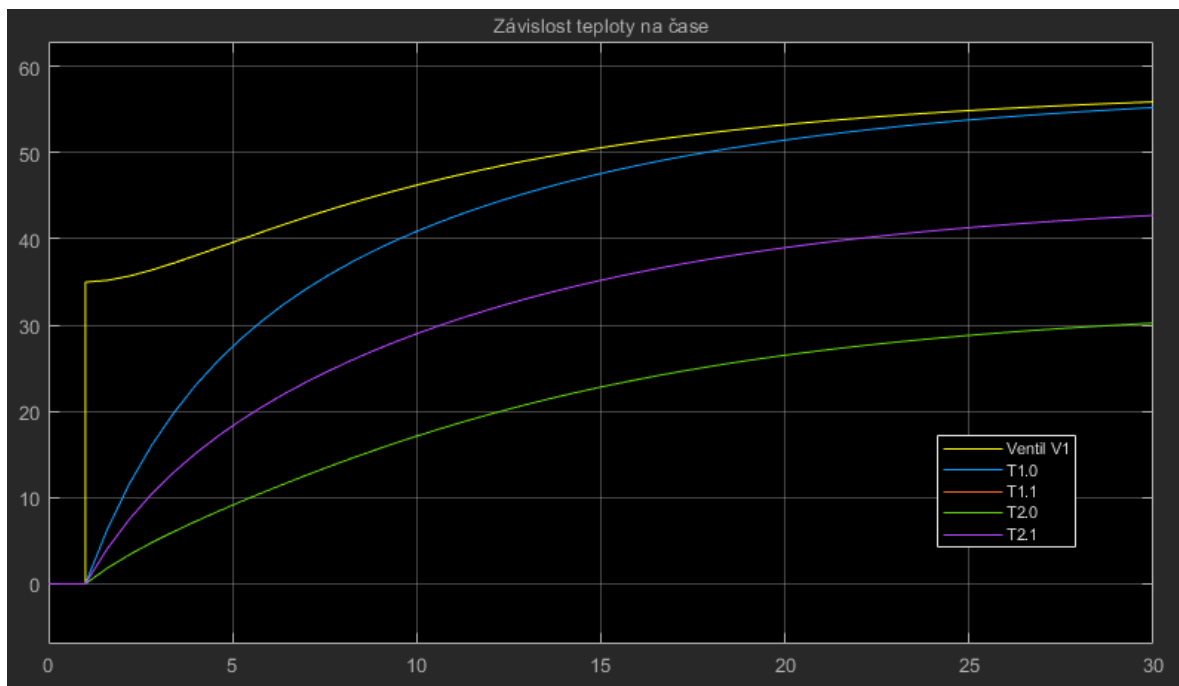
Obrázek 3.1 Dynamický model soustavy v prostředí Matlab Simulink



Obrázek 3.2 Výstup dynamického systému pro  $B = 0,45$

Na obrázku 3.2 je znázorněn výstupní graf systému při nastavení parametru B na hodnotu 0,45. Při tomto nastavení vyobrazuje simulace 90% přenos tepla z primárního do sekundárního okruhu. Důkazem jsou křivky T1.1 a T2.1. Z grafu je zřejmé, že na výstupu výměníku v primárním okruhu je menší teplota než na vstupu. Naopak u sekundárního okruhu je teplota na výstupu vyšší nežli na vstupu.

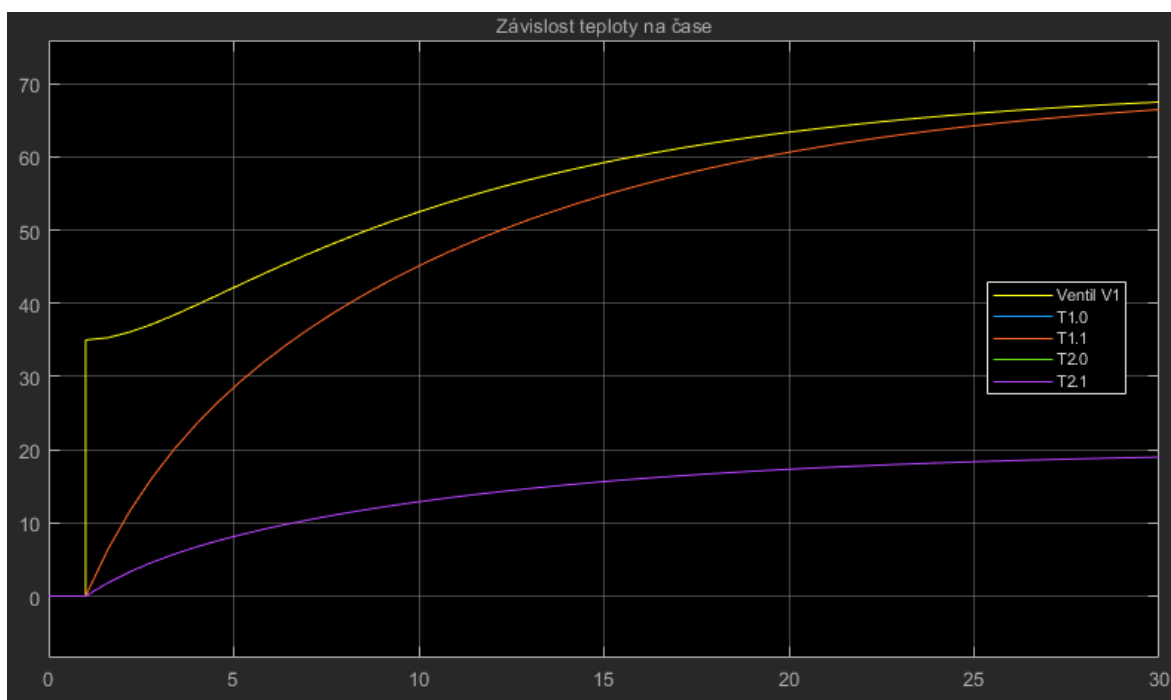
Křivka ventilu V1 má na začátku tvar jednotkového skoku. To je způsobeno tím, že ohřev vody je v simulaci nastaven jako jednotkový skok. Zároveň tato křivka reprezentuje akční zásah systému. Cílem navržení regulátoru je umožnit pomocí tohoto průběhu ventilu V1 regulovat libovolnou teplotu v systému. Podrobnějším řešením regulace se zabývá kapitola 3.3.



Obrázek 3.3 Výstup dynamického systému pro B = 0,5

Na obrázku 3.3 je výsledek dynamického systému při nastavení parametrů B na hodnotu 0,5. Při tomto nastavení je simulace nastavena do stavu 100 % přenosu tepla mezi primárním a sekundárním okruhem. To znamená, že obě teploty na výstupu výměníku v primárním i sekundárním okruhu jsou stejné.

$$T_{1.1} = T_{2.1} \quad (15)$$



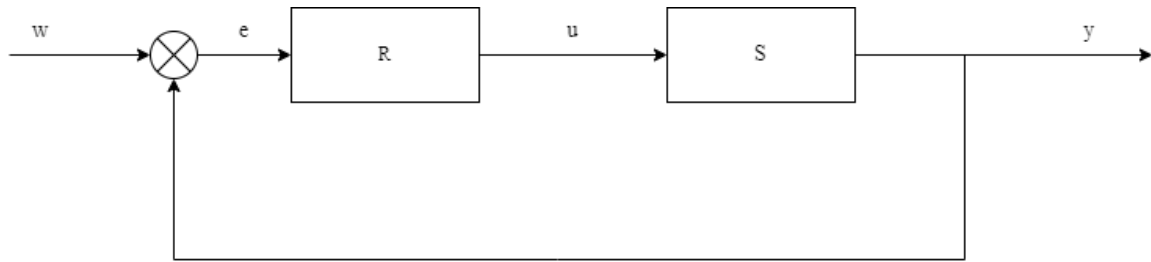
Obrázek 3.4 Výstup dynamického systém pro  $B = 0$

V tomto případě je parametr  $B$  nastaven na nulovou hodnotu, tudíž výměník tepla nepřenáší žádné teplo mezi primárním a sekundárním okruhem. Na obrázku 3.4 jsou průběhy vstupní teploty a výstupní teploty okruhů stejné. Chovají se jako dva oddělené okruhy a neprobíhá mezi nimi žádný přenos tepla. Platí zde vztahy:

$$T_{1.0} = T_{1.1} \quad (16)$$

$$T_{2.0} = T_{2.1} \quad (17)$$

### 3.3 Regulace



Obrázek 3.5 Blokové schéma regulačního obvodu

Cílem této kapitoly je návrh regulátoru pro řízení libovolné teploty v měřící stanici metodou Ziegler-Nicholse. Jako akční člen je zvolen ventil V1, který se nachází v primárním měřícím okruhu. Tento ventil nastavuje množství protečené teplé vody do okruhu z bojleru.

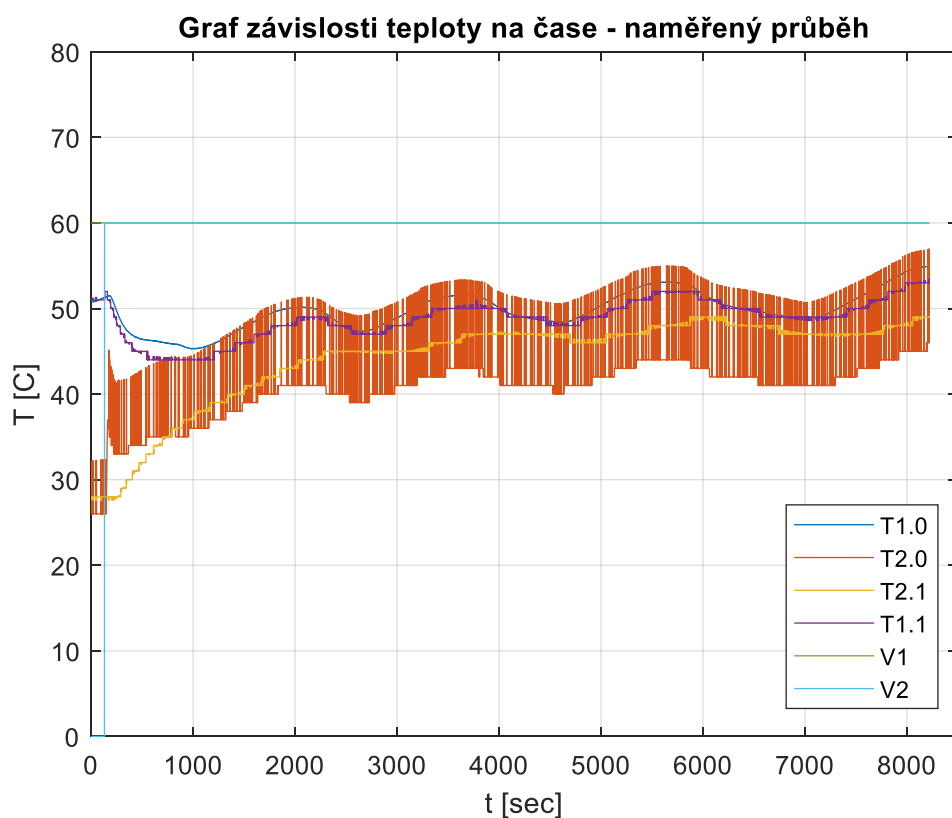
Metoda Ziegler-Nicholse spočívá v nalezení dvou kritických hodnot pro danou soustavu, konkrétně  $K_{krit}$  (kritické zesílení) a  $T_{krit}$  (kritická časová konstanta). Pro tyto dvě kritické hodnoty se systém nachází na mezi stability. Poté se pro získání zesílení a časových konstant regulátoru využije vzorců pro návrh parametrů. Výsledkem je regulátor, který zajistí zároveň stabilitu systému a možnost regulace pomocí akčního zásahu.

Tabulka 3.1 Vzorce pro návrh parametrů metodou Ziegler-Nicholse

Typ regulátoru	$K_R$	$T_I$	$T_D$
<b>P</b>	$K_R = 0.5K_{krit}$	-	-
<b>PI</b>	$K_R = 0.45K_{krit}$	$T_I = 0.85T_{krit}$	-
<b>PD</b>	doladíme na optimální hodnotu	-	
<b>PID</b>	$K_R = 0.6K_{krit}$	$T_I = 0.5 T_{krit}$	$T_D = 0.125T_{krit}$

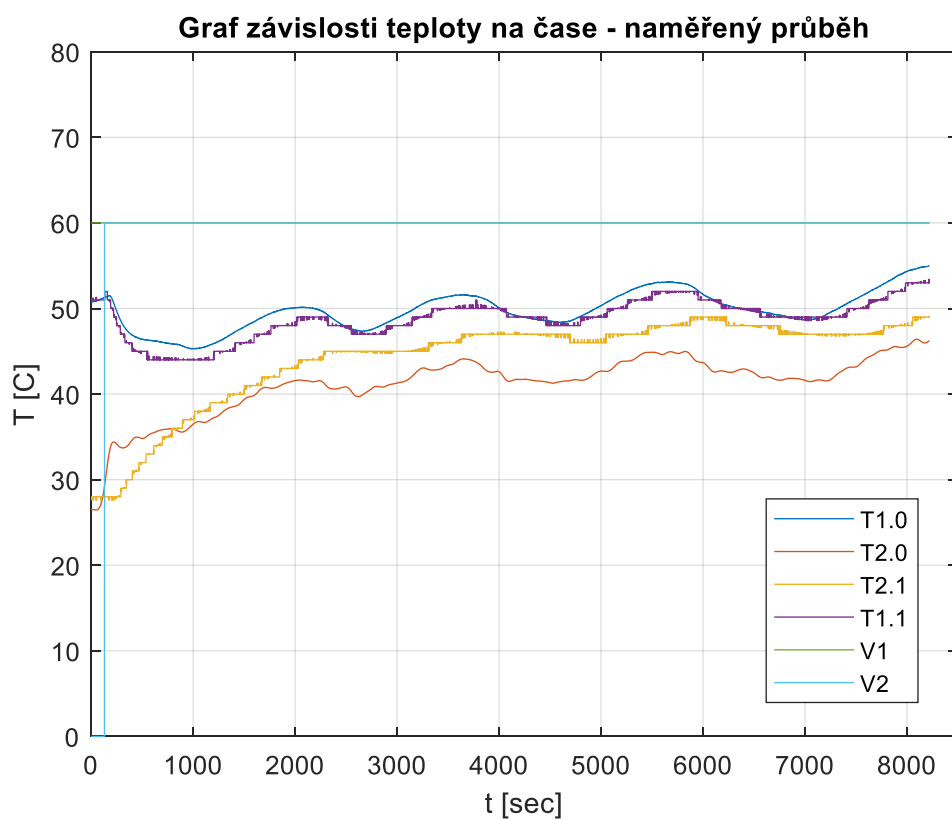
#### 3.3.1 Úprava nasimulovaného modelu – časová konstanta

Pro nalezení časové konstanty  $T$  byly využity výsledky měření na stanici. Pomocí vývojového prostředí Matlab byl načten soubor s výsledky měření do pracovního prostředí. Poté byl soubor rozdělen do vektorů, pomocí kterých byl sestaven graf výsledku měření.



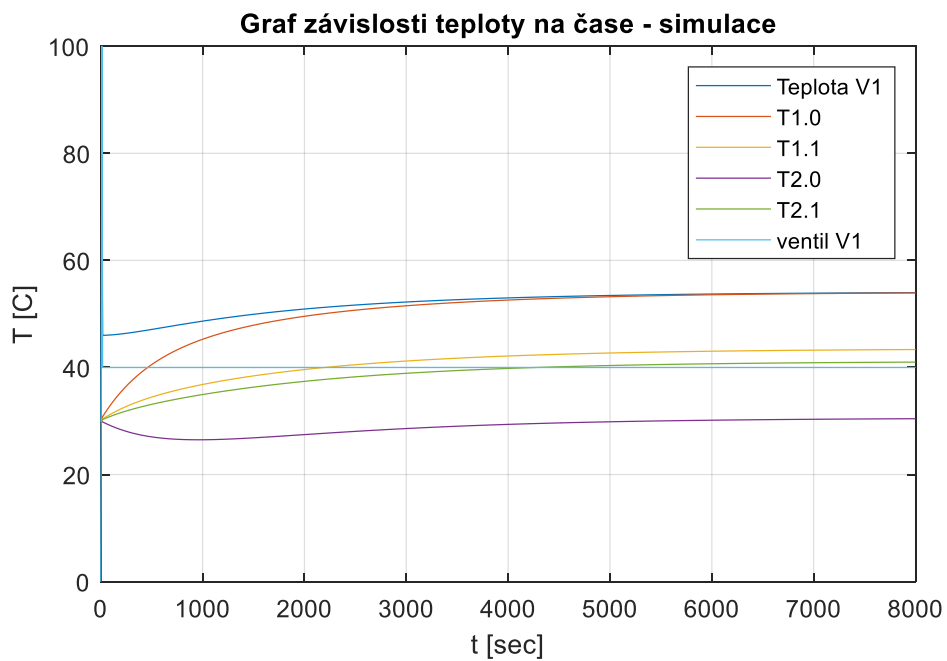
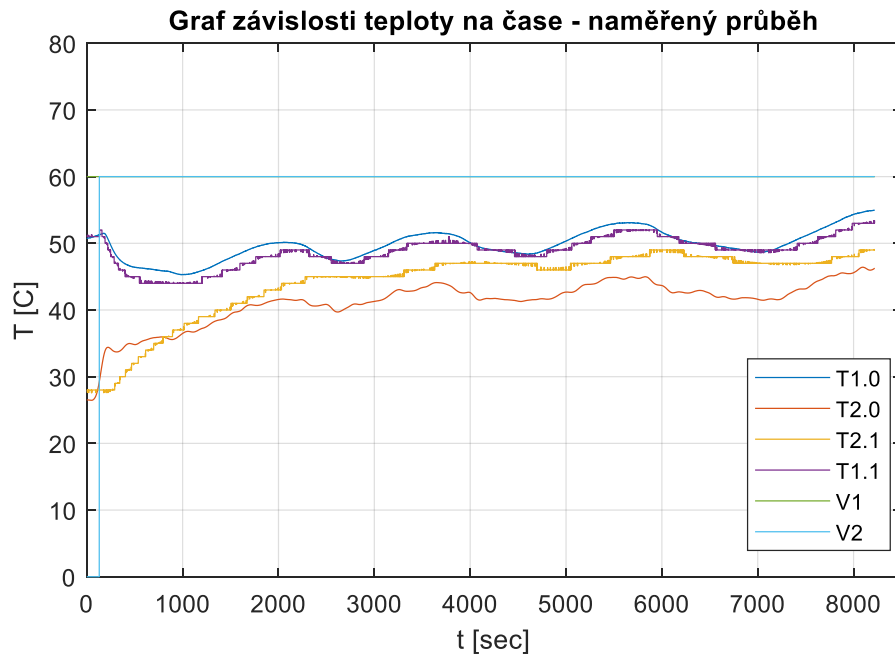
Obrázek 3.6 Graf závislosti teploty na čase

Z obrázku 3.6 je vidět, že teplota T2.0 je výrazně zkreslená šumem. Proto byl použit nástroj pro odstranění šumu ze signálu. Výsledný průběh s potlačeným šumem u teploty T2.0 lze vidět na obrázku 3.7.



Obrázek 3.7 Graf závislosti teploty na čase s potlačením šumu

Pomocí již vytvořené simulace lze nyní experimentálně zjistit hodnotu  $T$  porovnáním dynamiky průběhu simulace a výsledků reálného měření na stanici.



Obrázek 3.8 Porovnání naměřených a nasimulovaných dat

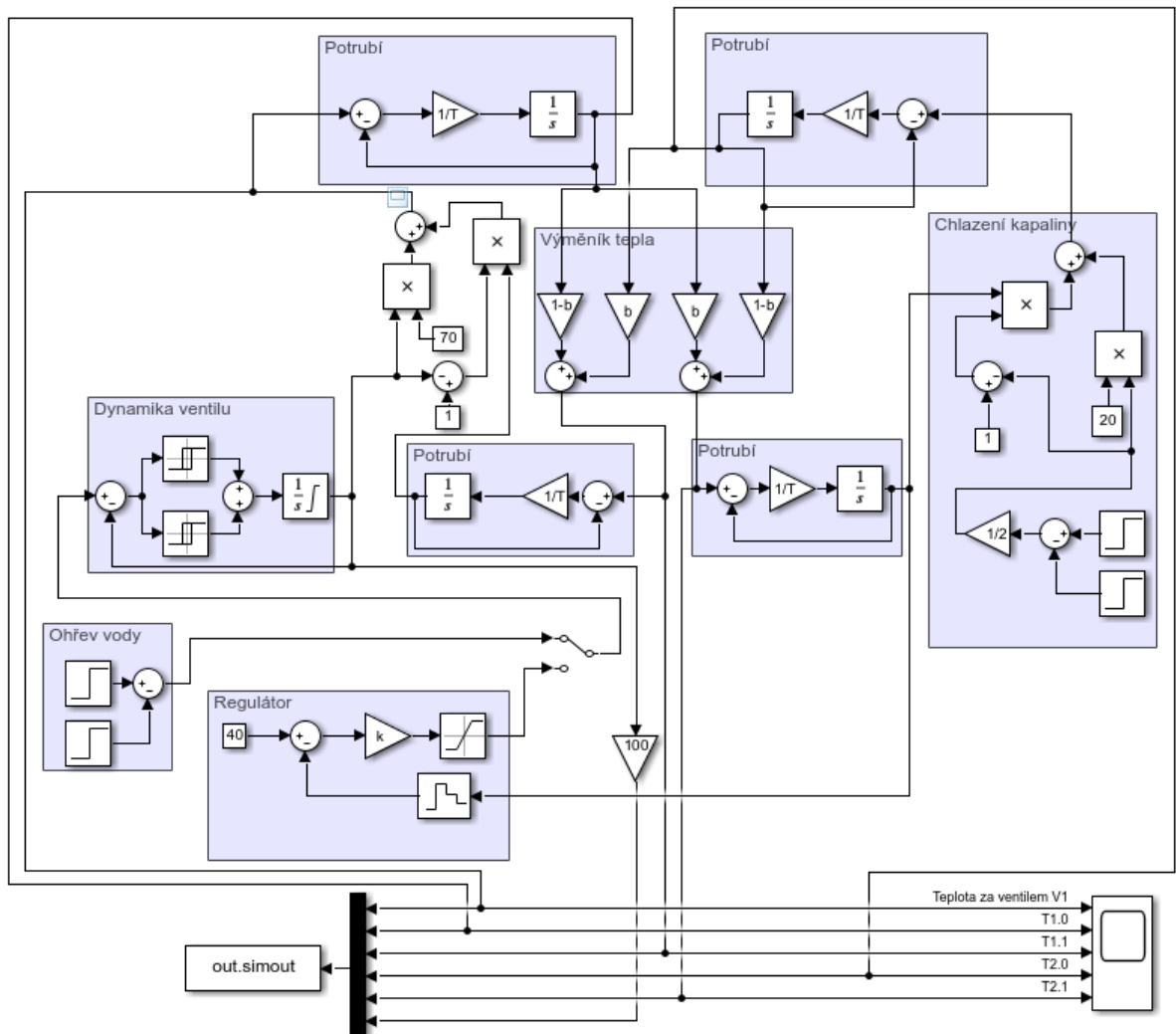
Po odzkoušení různých hodnot časové konstanty byla nalezena přibližně shodná dynamika systému. Z grafu naměřených dat na obrázku 3.8 lze vidět, že se v časovém

úseku 1000 sekund mění teplota přibližně o 5 °C. Tomu přibližně odpovídá simulace, kde je časová konstanta nastavena na hodnotu 500.

### 3.3.2 Určení $K_{krit}$ a $T_{krit}$

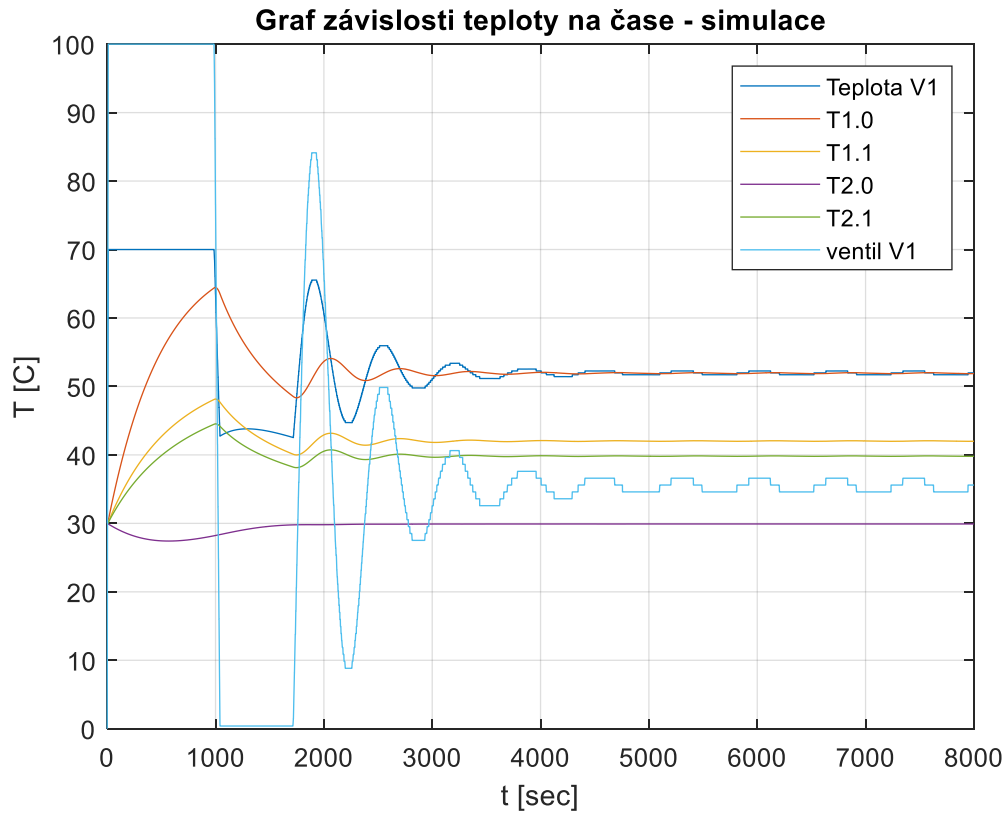
Pro zjištění hodnoty  $K_{krit}$  a  $T_{krit}$  je nutné upravit simulaci ve vývojovém prostředí Matlab Simulink. Konkrétně přidat regulátor, který bude ovládat akční zásah ve formě ventilu V1. Regulátor, který je v této kapitole navrhován je typu P, který obsahuje pouze zesilovací složku  $k$ , tudíž zde  $T_{krit}$  není potřebné určovat.

Je třeba zvolit teplotu, kterou má regulátor regulovat. Jako regulovaná teplota byla zvolena teplota T2.1, tedy teplota v místě, kde kapalina v sekundárním okruhu opouští výměník tepla a teče do topného tělesa. Za teoretického předpokladu aplikace této výměňkové stanice na reálnou soustavu je pravděpodobné, že právě tato teplota na výstupu sekundárního okruhu výměníku tepla bude žádanou teplotou pro koncového uživatele.



Obrázek 3.9 Dynamický model simulace s přidáním regulátorem

Po provedení změn v simulaci se experimentálně mění hodnota zesílení, dokud se systém nenalezne na mezi stability.



Obrázek 3.10 Graf závislosti teploty na čase měření – kritické zesílení

Z obrázku 3.10 je patrné, že se systém nachází na hranici stability, protože u akčního členu dochází k oscilaci, a to platí pro hodnotu zesílení 2.

$$K_{krit} = 2 \quad (18)$$

### 3.3.3 Výsledný regulátor

Předpis pro obecný regulátor typu P je:

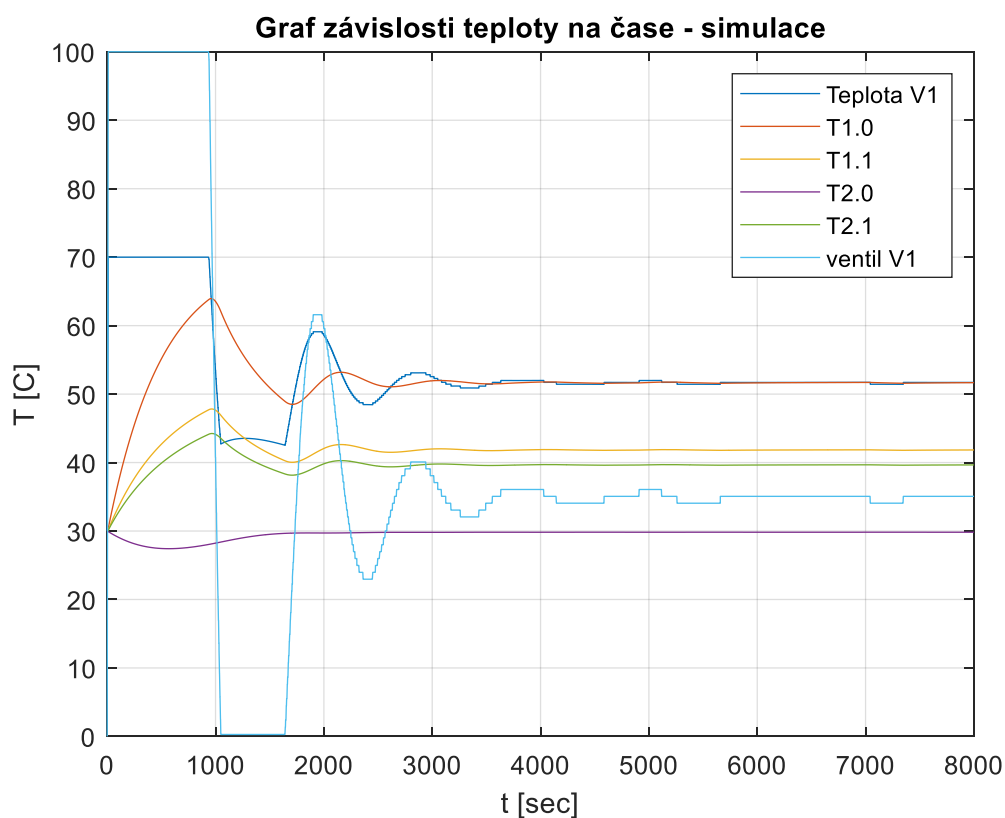
$$F_R(p) = K_R \quad (19)$$

Nyní jsou pomocí tabulky 3.1 je spočítány hodnoty parametru  $K_R$ :

$$K_R = 0,5 \cdot K_{krit} = 0,5 \cdot 2 = 1 \quad (20)$$

Výsledkem je regulátor typu P s přenosem:

$$F_R(p) = 1 \quad (21)$$



Obrázek 3.11 Graf závislosti teploty na čase měření – regulace

Regulátor typu P má v simulaci nastavenou požadovanou teplotu na 40 °C. Z grafu na obrázku 3.11 je patrné, že regulovaná teplota T2.1 se po 3000 sekundách změní na požadovaných 40 °C. Akční zásah ventilu V1 ke konci děje nekmitá, tudíž je systém stabilní.

Zároveň je třeba si uvědomit, že akční zásah reprezentuje elektromagnetický ventil, kterému trvá přibližně 10 sekund přejít ze stavu 100 % do 0 %. Tudíž by perioda kmitů neměla přesahovat hranici 10 sekund, což dle grafu akční zásah splňuje.

## 4. ZÁVĚR

Prvním a druhým bodem zadání je seznámit se a vytvořit projektovou dokumentaci technologie modelu výměňkové stanice v laboratoři ÚAMT. Realizace tohoto bodu je uvedena v kapitolách 1 a 2. Obsahují teoretické poznatky o použitých prvcích modelu výměňkové stanice, bloková i elektrická schémata modelu a jeho propojení s automatem PLC. Model stanice musel projít novým zapojením elektrických částí a zabudováním nových propojovacích portů k automatům PLC v laboratoři ÚAMT.

Třetí a čtvrtý bod zadání je zpracován v kapitole 3 kde se nachází návrh a realizace simulace ve vývojovém prostředí Matlab Simulink i s výslednými grafy simulací. Je zde podrobně popsán systém modelu výměňkové stanice, matematický model a návrh regulátoru.

Úspěšně se podařilo navrhnout pro systém proporcionální regulátor metodou Ziegler-Nicholse. Zesílení tohoto regulátoru je  $K_R = 1$ .

Za účelem správného nastavení simulace proběhlo dne 20.07.2022 měření na stanici. Celková doba měření trvala přibližně hodinu a půl. Příprava na toto měření trvala podobný časový úsek, kvůli pomalému nahřívání bojleru. Jakmile během měření nastane chyba například ve špatném nastavení ventilů musí se čekat, než se teplota vody uvnitř stanice dostane zpět na výchozí hodnotu. Výsledek měření je znázorněn na obrázku 3.6.

Pomocí vývojového prostředí Matlab byly výsledky zpracovány a následně použity pro nastavení časové konstanty simulovaných potrubí v modelu. Díky tomu byl vytvořen model, který má velmi podobnou dynamiku jako reálná výměňková stanice.

Pátý bod zadání je realizován v kapitole 2.3.3, kde je vytvořená vizualizace celé výměňkové stanice v rámci ovládacího HMI Panelu.

## LITERATURA

- [1] Pájené výměníky: SCHÉMA PROUDĚNÍ - Typ 0. In: G-MAR [online]. Karlovy Vary: G-MAR PLUS, 2014 [cit. 2021-01-02]. Dostupné z: <https://www.g-mar.cz/pajene-vymeniky/>
- [2] Bezdrátové teplotní čidlo Arexx IP-PT100 IP-PT100, -200 až +400 °C, teplotní senzor Pt100. In: Epristroje.cz [online]. Třebíč: I & CS, 2021 [cit. 2021-01-04]. Dostupné z: <https://www.epristroje.cz/bezdratove-teplotni-cidlo-arexx-ip-pt100-ip-pt100-200-az--400-c--teplotni-senzor-pt100/>
- [3] Pt100 (385) temperature resistance relationship. In: Beamex [online]. Beamex Oy Ab., 2021 [cit. 2021-01-02]. Dostupné z: <https://blog.beamex.com/pt100-temperature-sensor>
- [4] Blaha, P., Vavříň, P.: Řízení a regulace I - Základy regulace lineárních systémů - spojité a diskrétní. Elektronické skriptum VUT. Dostupné z: <https://docs.google.com/viewer?a=v&pid=sites&srcid=ZGVmYXVsdGRvbWVpbnxyaXplbmlhcmVndWxhY2UxfGd4OjYxNTNIYmM0NTJjYmViZTE> , 26.11.2019] (cs)
- [5] Základy řízení energetických strojů část 2. [online]. Liberec, 2012 [cit. 2022-05-22]. Dostupné z: [https://kke.zcu.cz/export/sites/kke/old\\_web/\\_files/projekty/enazp/19/IUT/123\\_Zaklady\\_rizeni\\_energetickych\\_stroju\\_2\\_-\\_Novotny\\_-\\_P2.pdf](https://kke.zcu.cz/export/sites/kke/old_web/_files/projekty/enazp/19/IUT/123_Zaklady_rizeni_energetickych_stroju_2_-_Novotny_-_P2.pdf). Odborný článek. Technická univerzita v Liberci fakulta strojní.
- [6] Yuvraj Bhushan Khare, „PID Control of Heat Exchanger System,“ International Journal of Computer Applications, 2010, vol. 8, no. 6, p. 22–27.
- [7] P. BLAHA, P. VAVŘÍN. Řízení a regulace I. VUT v Brně, 2005.
- [8] ČERNÍK, Michal. Heat Exchanger Regulation [online]. Brno, 2022. Dostupné také z: [https://kke.zcu.cz/export/sites/kke/old\\_web/\\_files/projekty/enazp/19/IUT/123\\_Zaklady\\_rizeni\\_energetickych\\_stroju\\_2\\_-\\_Novotny\\_-\\_P2.pdf](https://kke.zcu.cz/export/sites/kke/old_web/_files/projekty/enazp/19/IUT/123_Zaklady_rizeni_energetickych_stroju_2_-_Novotny_-_P2.pdf). Odborný článek. Department of Control and Instrumentation, Brno University of Technology, 61600 Brno, Czech Republic. Vedoucí práce O. Mihálik.
- [9] ŠMEJKAL, Ladislav a Marie MARTINÁSKOVÁ. PLC a automatizace. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 1999, 223 s. ISBN
- [10] SIMATIC S7-1500 1512C-1 PN manual [online]. 144 [cit. 2022-08-10]. Dostupné z: <https://www.automation.siemens.com/sce-static/learning-training-documents/tia-portal/hw-config-s7-1500/s7-1500-manual-en.pdf>
- [11] JEDLIČKA, Pavel. *Diagnostika laboratorního modelu výměníku tepla*. Brno, 2006. Diplomová práce. Ústav automatizace a měřicí techniky, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Prof. Ing. František Zezulka, CSc.

# SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

Z	Zdroj teplé vody
V1, V2	Elektromagnetický ventil
C1, C2	Čerpadlo
R	Tepelná zátěž
HE	Výměník tepla
M1, M2	Průtokoměr
T1.0, T1.1	Teplotní čidla primárního okruhu
T2.0, T2.1	Teplotní čidla sekundárního okruhu
PLC	Programovatelná logická jednotka
HMI	Rozhraní člověk-stroj

Symbole:

$R_T$	výsledný odpor	[ $\Omega$ ]
$R_0$	odpor při nulové teplotě	[ $\Omega$ ]
$\alpha_R$	teplotní součinitel odporu	[-]
$\Delta\vartheta$	změna teploty	[ $^{\circ}\text{C}$ ]
T	časová konstanta	[s]
t	teplota	[ $^{\circ}\text{C}$ ]
I	proud	[mA]
$K_R$	proporcionální složka regulátoru	[-]
$K_{\text{krit}}$	kritické zesílení proporcionální složky	[-]
T1.0, T1.1	teplota v teplotních čidlech primárního okruhu	[ $^{\circ}\text{C}$ ]
T2.0, T2.1	teplota v teplotních čidlech sekundárního okruhu	[ $^{\circ}\text{C}$ ]
k, B	konstanta účinnosti výměníku	[-]

## SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA A - SEZNAM DOKUMENTACE AKČNÍCH ČLENŮ A SNÍMAČŮ .....	50
PŘÍLOHA B - SEZNAM POUŽITÝCH SOUČÁSTEK V ELEKTRICKÉM ZAPOJENÍ.....	53
PŘÍLOHA C - PŘEVODNÍ TABULKY PRO SVORKY PLC V UČEBNĚ T12/SE 2.133.....	54
PŘÍLOHA D - SIMULACE V PROSTŘEDÍ MATLAB SIMULINK .....	56
PŘÍLOHA E - OVLÁDACÍ PROGRAM V PROSTŘEDÍ TIA PORTAL.....	57
PŘÍLOHA F - ELEKTRICKÉ ZAPOJENÍ STANICE.....	58

## Příloha A - Seznam dokumentace akčních členů a snímačů

### Parametry výměníku Alfa Laval CB14

	Hot side	Cold side
Hustota [kg/m <sup>3</sup> ]	988,7	993,8
Specifická tepelná kapacita [kJ/(kg*K)]	4,17	4,18
Tepelná vodivost [W/(m*K)]	0,637	0,619
Přívodní viskozita [cP]	0,546	1,01
Vývodní viskozita [cP]	0,665	0,654
Průtočné množství [kg/h]	238,6	129,1
Přívodní teplota [°C]	50	20
Odcházející teplota [°C]	39,2	40
Pokles tlaku [kPa]	0,828	0,349
Výkon výměníku [kW]	3	3

### Parametry čerpadel Grundfos Alpha+ 25-40

Tlak soustavy	Max 10 barů
Teplota čerpané kapaliny	+2 až +110 °C
Napájecí napětí	1 x 230 V, 50 Hz, PE
Třída krytí	IP 42
Třída izolace	F
Relativní vlhkost	Max. 95 %
Okolní teplota	0 až 40 °C
Provozní hlučnost	± 43 dB(A)

## Parametry ventilů RV111

Provedení	Dvoucestné a trojcestné
Rozsah světlostí	DN 15 – 40
Jmenovitý tlak	PN 16
Materiál tělesa	Šedá litina EN-JL 1030
Materiál kuželky	Nereznaocí ocel 1.4021/17 022.6
Rozsah pracovních teplot	+2 až +150 °C
Připojení	Nátrubek s vnějším závitem + závitové šroubení Příruba s hrubou těsnící lištou Nátrubek s vnějším závitem + přivařování šroubení
Materiál přivařovacích nátrubků	DN 15 až 32 .... 1.0036/11 373 DN 40 .... 1.0308/11 353
Typ kuželky	Tvarovaná nebo válcová
Průtočná charakteristika	Lineární
Regulační poměr	Min 50:1

## Parametry pohonu k ventilům SSC61

Napájecí napětí	AC 24 V
Frekvence	50/60 Hz
Příkon	2VA
Řízení	0-10V
Doba přechodu	30 s
Jmenovitá síla	300 N
Zdvih	5,5 mm
Krytí	IP 40
Maximální teplota média	2 až 110 °C
Přípustná teplota okolí	5 až 50 °C
Přípustná vlhkost okolí	0 až 95% bez kondenzace
Hmotnost	0,25 kg

## Parametry teploměrů PTP05 s převodníkem PP100

Měřicí rozsah	-25 °C až +120 °C Teplota hlavice nesmí přesáhnout 80 °C
Přesnost	±2,5 °C
Napájecí napětí	12..34 V DC
Kompenzace odporu přívodů	<0,03 %/1Ω
Linearizace	Parabolickou křivkou
Výstupní signál	4..20 mA
Chyba měření	<0,15 %
Chyba linearity	<0,1 %
Teplotní chyba	<0,01 %/°C
Vliv napájecího napětí	0,01 %/V
Přesnost převodu	<0,3 %
Časová konstanta	asi 35 s

## Parametry teploměru PTP55 s převodníkem PP100

Měřicí rozsah	+25°C až +120 °C
Přesnost	±0,5 % z rozsahu
Napájecí napětí	12...34V
Kompenzace odporu přívodů	<0,03 % / 1 Ω
Linearizace	Lineární
Výstupní signál	4...20 mA linearizovaný
Chyba měření	<0,15%
Chyba linearity	<0,1%
Teplotní chyba	<0,01 %/ °C
Vliv napájecího napětí	<0,01 %/ V
Přesnost převodu	<0,3 %
Určené pro:	Kapaliny
Elektrická pevnost:	500 V
Okolní teplota:	-25 ... +80 °C
Přetlak kapaliny:	Max. 2,5 MPa
Časová konstanta	asi 7 s

## **Příloha B - Seznam použitých součástek v elektrickém zapojení**

<b>Název součástky</b>	<b>Označení ve schématu</b>
<b>Relé</b>	Q2; Q5; Q6
<b>Stykače</b>	Q1; Q3; Q4; Q7
<b>Stejnoseměrný zdroj</b>	T3
<b>Transformátor</b>	T2
<b>Led diody</b>	P1;
<b>Jističe</b>	F1; F3; F4; F5; F6; F7
<b>Tlačítka</b>	S2; S3; S4
<b>STOP tlačítko</b>	S1;
<b>Sběrnice DB-25</b>	Y7; Y8
<b>Bojler</b>	Y1
<b>Čerpadla</b>	Y2; Y3
<b>Elektromagnetické ventily</b>	Y4; Y5
<b>Termistory</b>	B1; B2; B3; B4

## Příloha C - Převodní tabulky pro svorky PLC v učebně T12/SE 2.133

### Digitální vstupy a výstupy

Žíla kabelu	Karta	Číslo svorky (karta)	Číslo pinu (konektor)
1 (red)	DI/DO 2	6	1
2	DI/DO 2	7	14
3	DI/DO 2	8	2
4	DI/DO 2	11	15
5	DI/DO 2	12	3
6	DI/DO 2	13	16
7	DI/DO 2	14	4
8	DI/DO 2	15	17
9	DI/DO 2	16	5
10	DI/DO 2	17	18
11	DI/DO 2	18	6
12	DI/DO 2	26	19
13	DI/DO 2	27	7
14	DI/DO 2	28	20
15	DI/DO 2	31	8
16	DI/DO 2	32	21
17	DI/DO 2	33	9
18	DI/DO 2	34	22
19	DI/DO 2	35	10
20	DI/DO 2	36	23
21	DI/DO 2	37	11
22	DI/DO 2	38	24
23	DI/DO 2	9	12
24	-	GND	25
25	-	GND	13

## Analogové vstupy a výstupy

Žíla kabelu	Karta	Číslo svorky (karta)	Číslo pinu (konektor)
<b>1 (red)</b>	AI/AO	1	1
<b>2</b>	AI/AO	2	14
<b>3</b>	AI/AO	3	2
<b>4</b>	AI/AO	4	15
<b>5</b>	AI/AO	5	3
<b>6</b>	AI/AO	6	16
<b>7</b>	AI/AO	7	4
<b>8</b>	AI/AO	8	17
<b>9</b>	AI/AO	9	5
<b>10</b>	AI/AO	10	18
<b>11</b>	AI/AO	11	6
<b>12</b>	AI/AO	12	19
<b>13</b>	AI/AO	13	7
<b>14</b>	AI/AO	14	20
<b>15</b>	AI/AO	15	8
<b>16</b>	AI/AO	16	21
<b>17</b>	AI/AO	17	9
<b>18</b>	AI/AO	18	22
<b>19</b>	AI/AO	19	10
<b>20</b>	AI/AO	20	23
-	-	-	11
-	-	-	24
-	-	-	12
-	-	-	25
-	-	-	13

# **Příloha D - SIMULACE V PROSTŘEDÍ Matlab SIMULINK**

Tento soubor je uložen ve zkomprimované složce na přiloženém CD

## **Příloha E - Ovládací program v prostředí Tia Portal**

Tento soubor je uložen ve zkomprimované složce na přiloženém CD

# **Příloha F - ELEKTRICKÉ ZAPOJENÍ STANICE**

Tento soubor je uložen jako soubor .pdf na přiloženém CD