



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

DIGITÁLNÍ DVOJČE VÝMĚNÍKOVÉ STANICE

DIGITAL TWIN OF THE HEAT EXCHANGER STATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Radim Vancí

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michal Husák

BRNO 2024

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Automatizační a měřicí technika**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Radim Vancí

ID: 240464

Ročník: 3

Akademický rok: 2023/24

NÁZEV TÉMATU:

Digitální dvojče výměňkové stanice

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je vytvořit virtuální model výměňku, který bude digitálním dvojčetem reálného systému.

1. Seznamte se s fyzickým modelem výměňkové stanice.
2. Realizujte propojení reálného modelu a řídicího systému pro ovládání a sběr dat.
3. Vytvořte testovací scénáře chodu systému pro účely identifikace.
4. Navrhněte strukturu matematického model.
5. Identifikujte parametry modelu.
6. Vlastnosti realizovaného systému vyhodnoťte a dosažené výsledky prezentujte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] VÁŇA, Dominik. Simulace modelu pomocí nástroje SIMIT. Brno, 2018, 111 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních

technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce: Ing. Jakub Arm

[2] STANĚK, Václav. Návrh digitálního dvojčete CNC obráběcího stroje. Brno, 2019. Dostupné

také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117544>. Diplomová práce. Vysoké učení

technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky.

Vedoucí práce Michal Holub

Termín zadání: 5.2.2024

Termín odevzdání: 22.5.2024

Vedoucí práce: Ing. Michal Husák

Ing. Miroslav Jirgl, Ph.D.

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 identifikací a realizací simulačního modelu výměníkové stanice. Teoretická část popisuje pojem digitální dvojče a komponenty, které jsou použity v modelu výměníkové stanice. Praktická část je rozdělena do dvou částí. V první části je popsán sběr dat z modelu výměníkové stanice. Ve druhé části je popsán návrh modelu a simulace výměníkové stanice.

KLÍČOVÁ SLOVA

výměník tepla, výměníková stanice, PLC, simulace, model, identifikace

ABSTRACT

The thesis deals with identification and realization of the simulation model of the exchange station. The theoretical part describes the concept of a digital twin and the components that are used in the model of the heat exchanger station. The practical part is divided into two parts. The first part describes the collection of data from the exchange station model. The second part describes the design of the model and the simulation of the exchanger station.

KEYWORDS

heat exchanger, heat exchanger station, PLC, simulation, model, identification

VANCL, Radim. *Digitální dvojče výměňkové stanice* . Bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky, 2024. Vedoucí práce: Ing. Michal Husák

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení autora: Radim Vancí
VUT ID autora: 240464
Typ práce: Bakalářská práce
Akademický rok: 2023/24
Téma závěrečné práce: Digitální dvojče výměňkové stanice

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/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno
.....
podpis autora*

*Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Michalu Husákovi za odborné vedení, konzultace, trpělivost a cenné rady při tvorbě mé bakalářské práce.

Obsah

Úvod	12
1 Digitální dvojče	13
1.1 Jak funguje digitální dvojče?	13
1.2 Využití digitálního dvojčete	14
1.3 Úroveň digitalizace	14
2 Model výměníkové stanice	15
2.1 Popis použitých komponentů	18
2.1.1 Výměník tepla	18
2.1.2 Odporový snímač teploty PTP05	18
2.1.3 Odporový teploměr s hlavicí PTP55	19
2.1.4 Vodoměr	19
2.1.5 Oběhové čerpadlo	19
2.1.6 Ohřívač vody	19
2.1.7 Expanzní nádoba	19
2.1.8 Snímač tlakové difference	20
2.1.9 Regulační ventil a servopohon	20
3 Řízení modelu výměníkové stanice	21
3.1 Výukové pracoviště	21
3.2 Vývojové prostředí	22
3.3 Vstupy a výstupy	22
3.4 Použité programovací jazyky PLC	23
3.5 Program pro řízení modelu výměníkové stanice	24
3.5.1 Měření teploty	24
3.5.2 Řízení ventilů	24
3.5.3 Ovládání akčních členů	25
3.5.4 Výpočet průtoku	25
3.5.5 Program měření	26
3.5.6 Hlavní obrazovka vzdáleného dohledu	27
3.5.7 Obrazovka manuálního ovládání	27
3.5.8 Obrazovka ventily-průtokoměry-teploměry	28
3.5.9 Obrazovka nastavení měřicích scénářů	29
3.6 Měření	29
3.6.1 Postup měření	30
3.6.2 Měřicí scénáře	30

4	Simulace	33
4.1	Simulační model v prostředí MATLAB Simulink	33
4.1.1	Matematický model - obecné rovnice	34
4.1.2	Metoda konečných diferencí	36
4.1.3	Model protiproudého výměníku	37
4.1.4	Model ohřívače vody	39
4.1.5	Model potrubí	40
4.1.6	Model radiátoru	41
4.1.7	Model ventilu	41
4.2	Metody pro odhad parametrů modelu	43
4.2.1	Funkce Fminunc	44
4.2.2	Funkce Fminsearch	44
4.2.3	System Identification Toolbox	46
4.2.4	Funkce GA	46
4.3	Vyhledávání parametrů modelu výměníkové stanice	47
4.4	Porovnání naměřených a nasimulovaných hodnot	48
4.5	Možnosti budoucích vylepšení modelu	55
	Závěr	56
	Literatura	57
	Seznam příloh	61
A	Grafy	62
A.1	Průběhy naměřených a nasimulovaných hodnot	62
A.2	Perioda vzorkování	69
B	Schéma zapojení	72
C	Obsah přiloženého USB flash disku	78
C.1	MATLAB program a Simulink model	78
C.2	Program pro ovládání a sběr dat v TIA Portal	78

Seznam obrázků

1.1	Jednolivé operace procesu technologie Digital Twin [3]	13
2.1	Model výměňkové stanice	15
2.2	P&I diagram modelu výměňkové stanice tepla	16
3.1	Pracoviště s PLC a HMI	21
3.2	Konektory CAN25 [8]	22
3.3	Stavový automat programu měření	26
3.4	Obrazovka vzdáleného dohledu	27
3.5	Obrazovka manuálního ovládání	28
3.6	Obrazovka ventily-průtokoměry-teploměry	28
3.7	Obrazovka nastavení měřicích scénářů	29
3.8	Příklad naměřených hodnot pomocí funkce Traces	30
4.1	Simulační model v prostředí MATLAB Simulink	33
4.2	Model výměníku tepla	38
4.3	Schéma MKD protiproudého výměníku tepla	38
4.4	Dynamika průtokového ohřívače vody	39
4.5	Model průtokového ohřívače vody	40
4.6	Model potrubí	40
4.7	Model radiátoru	41
4.8	Model ventilu	42
4.9	Odezva ventilu	43
4.10	Ukázka bodů, které může fminsearch vypočítat [11]	45
4.11	Ukázka části tréninkového průběhu	49
4.12	Ukázka tréninkového průběhu při úplném uzavření ventilu V2	50
4.13	Ukázka části validačního průběhu 1	51
4.14	Ukázka validačního průběhu 1 při úplném uzavření ventilu V2	52
4.15	Ukázka části validačního průběhu 2	53
4.16	Ukázka validačního průběhu 2 při úplném uzavření ventilů V1 a V2	54
A.1	Tréninkový průběh - naměřené a nasimulované teploty	63
A.2	Validační průběh 1 - naměřené a nasimulované teploty	64
A.3	Validační průběh 2 - naměřené a nasimulované teploty	65
A.4	Tréninkový průběh	66
A.5	Validační průběh 1	67
A.6	Validační průběh 2	68
A.7	Perioda vzorkování - tréninkový průběh	69
A.8	Perioda vzorkování - validační průběh 1	70
A.9	Perioda vzorkování - validační průběh 2	71
B.1	Schéma zapojení - List 1	73

B.2	Schéma zapojení - List 2	74
B.3	Schéma zapojení - List 3	75
B.4	Schéma zapojení - List 4	76
B.5	Schéma zapojení - List 5	77

Seznam tabulek

3.1	Vstupní proměnné PLC	23
3.2	Výstupní proměnné PLC	23
3.3	Jazyky normy IEC EN 61131-3	23
3.4	Stavy tréninkového a 1. validačního scénáře měření	31
3.5	Stavy 2. validačního scénáře měření	32

Úvod

Tato práce se věnuje identifikaci a realizaci simulačního modelu výměníkové stanice, které jsou hojně využívány k distribuci tepla ve vytápěných objektech a k ohřevu vody. Výměníkové stanice se skládají ze dvou okruhů – primárního a sekundárního. Pro předání tepelné energie mezi těmito okruhy slouží výměník tepla.

Cílem této práce je naměření dat z reálného modelu výměníkové stanice, vytvoření testovacího scénáře pro účely identifikace parametrů modelu, vytvoření matematického modelu ve vývojovém prostředí MATLAB a MATLAB Simulink a identifikace parametrů modelu.

Práce je rozdělena do čtyř hlavních kapitol. V kapitole 1 je popsáno, co si můžeme představit pod pojmem digitální dvojče, jak digitální dvojče funguje a jeho využití. Také jsou zde popsány úrovně digitalizace, jako digitální model, digitální stín, digitální dvojče a rozdíly mezi těmito jednotlivými úrovněmi.

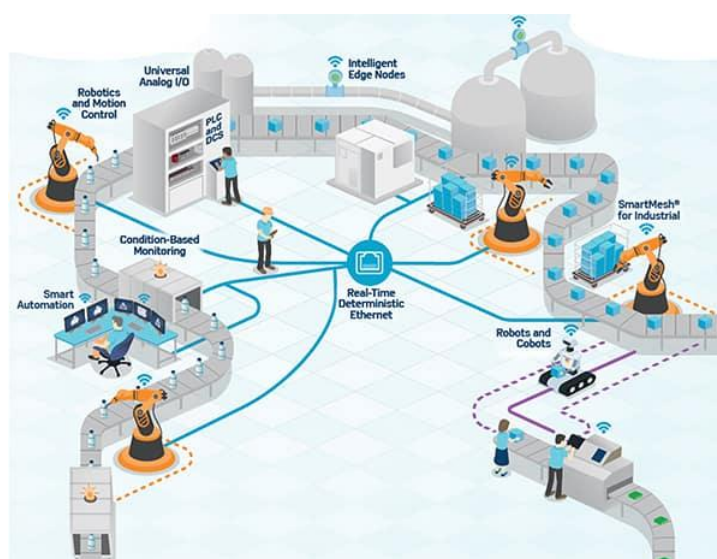
V kapitole 2 je podrobně popsán model výměníkové stanice a jednotlivé komponenty, jejich parametry a využití, ze kterých se výměníková stanice skládá.

V kapitole 3 je popsáno výukové pracoviště, které bylo použito pro sběr dat a řízení modelu výměníkové stanice a program sloužící pro sběr dat a řízení výměníkové stanice. Také je zde podrobně popsán postup měření a měřicí scénáře určené pro identifikaci parametrů modelu.

V kapitole 4 je popsána struktura matematického modelu, model výměníkové stanice vytvořený ve vývojovém prostředí MATLAB a MATLAB Simulink, optimalizační metody pro vyhledávání parametrů systému, porovnání naměřených a nasimulovaných hodnot pro různé měřicí scénáře a možnosti budoucích vylepšení modelu.

1 Digitální dvojče

Digitální dvojče je digitální model reálného výrobního nebo měřicího automatizovaného zařízení. Díky tomuto digitálnímu modelu můžeme simulovat veškeré funkce a komunikaci mezi jednotlivými částmi zařízení. Pomocí digitálního dvojčete se dají zjistit nedostatky a chyby zařízení ještě před tím, než je uvedeno do provozu. Za pomoci digitálního dvojčete lze zkrátit dobu uvedení nových linek do provozu a ušetřit finanční prostředky za fyzické modely, jelikož všechny potřebné testy jsou odsimulovány na virtuálním modelu. Důležité využití digitálního dvojčete je při návrhu automatizace budov, díky čemuž si lze odsimulovat toky a spotřebu energií a jejich vazby na okolní prostředí [2][3].



Obr. 1.1: Jednotlivé operace procesu technologie Digital Twin [3]

1.1 Jak funguje digitální dvojče?

Pomocí senzorů připojených k výrobní lince se shromažďují data, která jsou nahrávána do digitálního modelu, což umožňuje simulaci v reálném čase. Při klasickém návrhu nového zařízení se nejprve vytvoří koncept, poté design, dále se naprogramuje řídicí algoritmus, který je nahrán do PLC a nakonec se výsledné zařízení uvede u zákazníka do provozu. Normálně tyto jednotlivé kroky návrhu probíhají sekvenčně, ale za pomoci digitálního dvojčete lze tyto dílčí kroky provádět paralelně, díky čemuž se cyklus výrobního procesu nového zařízení zkrátí v průměru o 30 % [2][3].

1.2 Využití digitálního dvojčete

Digitální dvojče se využívá při vývoji a testování různých komponentů, strojů, systémů atd.. Digitální dvojče má využití v mnoha odvětvích. Mezi ty hlavní patří výroba, zdravotní péče, energetika a územní plánování [2][3].

1.3 Úroveň digitalizace

Úroveň digitalizace určuje úroveň virtuální reprezentace fyzického modelu. Mezi vyšší úroveň digitalizace se řadí virtuální dvojče, mezi nižší úroveň se řadí digitální model a digitální stín. Úrovně digitalizace jsou za sebe často zaměňovány. Pro přehlednost jsou v této kapitole popsány rozdíly mezi těmito jednotlivými úrovněmi [4].

Digitální model

Digitální model je odrazem reality, který je vytvořen ručně a funguje v offline režimu. Při změně reality nedochází ke změně digitálního modelu. Jedná se o 3D reprezentaci objektu, která je využívána pro simulaci a analýzu [5].

Digitální stín

Digitální stín je virtuální kopie fyzického modelu, která dokáže reagovat na změny reality. Přestože digitální stín dokáže reagovat na změny reálného modelu, nelze jím reálný model řídit, jelikož nedisponuje automatizovanou zpětnou vazbou v reálném čase. Digitální stín umožňuje pouze jednosměrný datový tok, což je hlavním rozdílem oproti digitálnímu dvojčeti, za nějž je často zaměňován [5].

Digitální dvojče

Jedná se o nejvyšší úroveň digitalizace. Umožňuje obousměrný tok dat, díky čemuž může digitální dvojče pomocí automatizovaného přenosu informací z reálného modelu přímo ovlivňovat řízení fyzického modelu [5].

2 Model výměníkové stanice

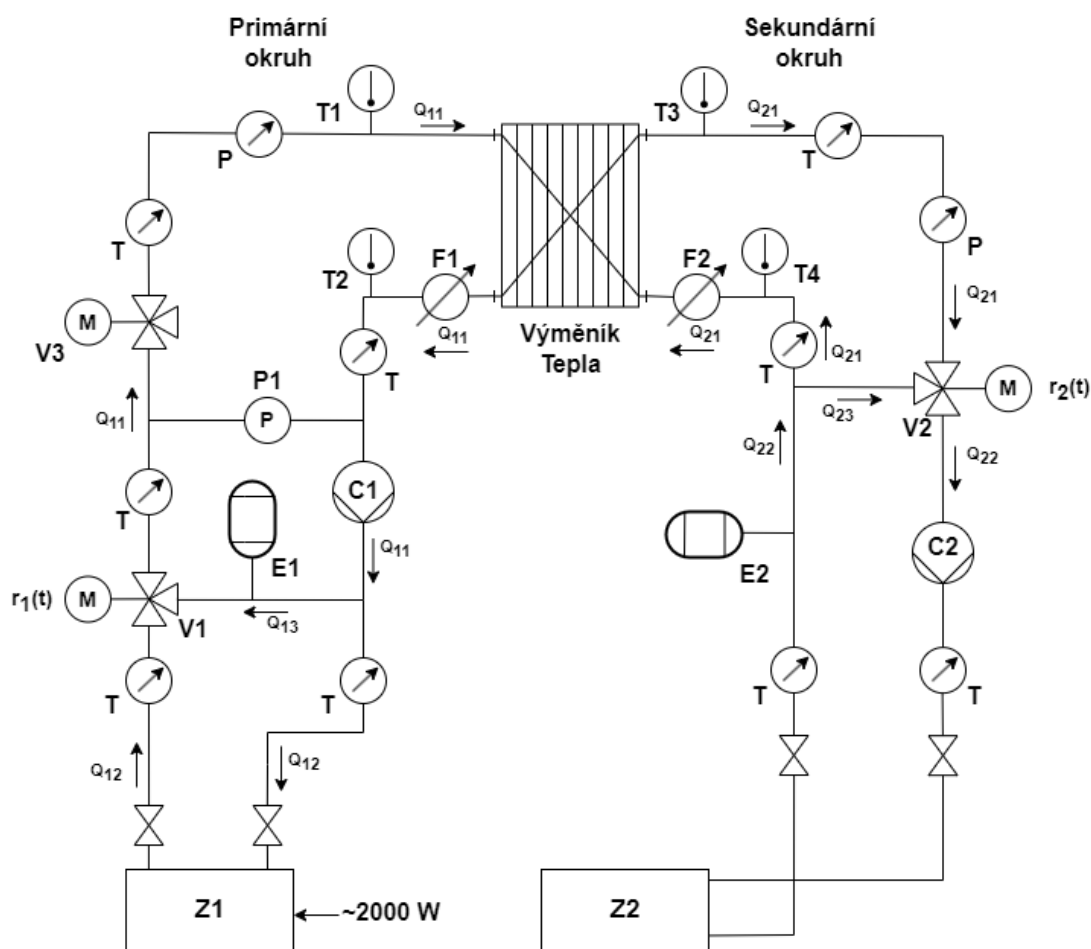
Model výměníkové stanice tepla se skládá ze dvou okruhů (primárního a sekundárního). Okruhy jsou od sebe odděleny nepropustnou stěnou rekuperačního výměníku tepla typu voda-voda. V primárním okruhu je umístěn průtokový ohřívač, který obstarává ohřev vody a v sekundárním okruhu se nachází spotřebič tepla (radiátor), kterým je předáváno teplo výměníkem ohřáté vody do okolí.



Obr. 2.1: Model výměníkové stanice

Primární okruh je tvořen průtokovým ohřívačem a oběhovým čerpadlem, které slouží k cirkulaci vody v primárním okruhu, aby byla udržována požadovaná teplota vody. Dále se v okruhu nacházejí příložné odporové snímače teploty s proudovým výstupem 4...20 mA, analogové ručičkové teploměry informující o stavu teploty, analogový ručičkový tlakoměr informující o stavu tlaku, snímač tlakové difference, vodoměr s impulsním výstupem, třicestné regulační ventily se servopohony ovládané stejnosměrným napětím 0...10 V a tlaková expanzní nádoba s vakem a pojišťovacím ventilem.

Konstrukce výměníkové stanice je detailně popsána v následujícím P&I diagramu.



Obr. 2.2: P&I diagram modelu výměníkové stanice tepla

- **Z1** – zásobníkový ohřívač Ariston o objemu 10 litrů, výkon 2 kW.
- **Z2** – spotřebič tepla - radiátor.
- **C1** – oběhové čerpadlo (GRUNDFOS ALPHA+ 15-40 180) umístěné v primárním okruhu výměníku.
- **C2** – oběhové čerpadlo (GRUNDFOS ALPHA+ 15-40 180) umístěné v sekundárním okruhu výměníku.

- **F1** – vodoměr s pulsním výstupem (ENBRA TCM 142/99-3047) umístěný v primárním okruhu výměníku.
- **F2** – vodoměr s pulsním výstupem (ENBRA TCM 142/99-3047) umístěný v sekundárním okruhu výměníku.
- **V1** – třicestný regulační ventil (LBM RV 111 R) se servopohonem SSC61 umístěný na výstupu zásobníkového ohřívače.
- **V2** – třicestný regulační ventil (LBM RV 111 R) se servopohonem SSC61 umístěný v sekundárním okruhu výměníku.
- **V3** – třicestný regulační ventil (LBM RV 111 R) se servopohonem SSC61 umístěný v primárním okruhu výměníku.
- **T1** – teploměr umístěný na vstupu výměníku v primárním okruhu. Příložný odporový snímač teploty (Rawet PTP05).
- **T2** – teploměr umístěný na výstupu výměníku v primárním okruhu. Příložný odporový snímač teploty (Rawet PTP05).
- **T3** – teploměr umístěný na výstupu výměníku v sekundárním okruhu. Odporový snímač teploty s hlavicí (Rawet PTP55).
- **T4** – teploměr umístěný na vstupu výměníku v sekundárním okruhu. Příložný odporový snímač teploty (Rawet PTP05).
- **E1** – tlaková expanzní nádoba (CIMM ACS) s vakem a pojišťovacím ventilem umístěná v primárním okruhu výměníku.
- **E2** – tlaková expanzní nádoba (CIMM ACS) s vakem a pojišťovacím ventilem umístěná v sekundárním okruhu výměníku.
- **P1** – snímač tlakové difference (BD Sensors DMD331) umístěný v primárním okruhu výměníku.
- **P** – analogové ručičkové tlakoměry s rozsahem 0...250 kPa.
- **T** – analogové ručičkové teploměry s rozsahem 0...120 °C.
- **Q_{ij}** – průtoky v jednotlivých částech modelu.
- **r₁(t)** – poměr otevření ventilu V1.
- **r₂(t)** – poměr otevření ventilu V2.

2.1 Popis použitých komponentů

V této kapitole jsou popsány parametry a využití jednotlivých komponentů výměníkové stanice.

2.1.1 Výměník tepla

Výměník tepla je zařízení, ve kterém proudí teplotnosné médium, pomocí něhož je předávána tepelná energie. Tepelná energie je předávána z teplého média do studenějšího média [6].

V tomto modelu je využit rekuperační deskový výměník ALFA LAVAL CD14 typu voda-voda. V primárním okruhu proudí voda opačným směrem než v sekundárním okruhu, jedná se tedy o protiproudý výměník. U protiproudého výměníku dochází k efektivnějšímu přenosu tepla, než je tomu u jiných typů výměníku (soproudý a křížový).

Způsob předávání tepla

U rekuperačního výměníku nedochází k přímému kontaktu teplotnosných medií. Ohřívající a ohřívané médium je odděleno nepropustnou stěnou. Teplo je zde přenášeno pomocí prostupu tepla přes nepropustnou stěnu [6].

Mezi další typy výměníků podle způsobu předávání tepla patří výměníky regenerační, kontaktní a směšovací [6].

Konstrukční provedení

Deskový výměník tepla je tvořen mnoha tenkými kovovými deskami, které jsou k sobě přivařeny (nerozebíratelný výměník) nebo jsou k sobě staženy za pomoci šroubů (rozebíratelný výměník) [6].

Další možné konstrukční provedení výměníků tepla jsou trubkové, bubnové, šroubové, žebrové apod. [6].

2.1.2 Odporový snímač teploty PTP05

Teploměr typu PTP05 je určen pro měření teploty na povrchu potrubí. Konstrukce je tvořena plastovou krabičkou, do které je zalisován měděný plech. Teplota měděného plechu je měřena odporovým teplotním snímačem PT100. K potrubí je teploměr připevněn pomocí stahovacího pásu. Teploměr může mít různé výstupy (4...20 mA, 0...10 V nebo RS485), které jsou dány volbou převodníku [1].

Pro tento model jsou použity tři teploměry typu PTP05 (T1, T2, T4) od firmy Rawet napájené 24 V v konfiguraci proudový výstup 4...20 mA s rozsahem 0 – 80 °C.

2.1.3 Odporový teploměr s hlavicí PTP55

V modelu je použit jeden odporový snímač teploty s hlavicí PTP55 (T3) od firmy Rawet, který je umístěn na výstupu výměníku v sekundárním okruhu. Snímač má proudový výstup 4...20 mA s rozsahem 0 – 100 °C.

2.1.4 Vodoměr

Model výměníkové stanice obsahuje dva vodoměry TCM 142/99-3047 (F1, F2) od firmy Enbra. Jeden je umístěn v primárním okruhu na výstupu výměníku a druhý v sekundárním okruhu na vstupu výměníku. Vodoměry jsou vybaveny pulzním výstupem 10 l/imp. Pomocí PLC můžeme tyto pulsy zachytávat a spočítat rychlost proudění vody v potrubí.

2.1.5 Oběhové čerpadlo

Čerpadla použitá na výměníkové stanici jsou od firmy Grundfos a nesou označení ALPHA+ 25-40 180 (C1, C2). Čerpadlo je vybaveno automatickým řízením pomocí vyhodnocování diferenčního tlaku, což umožňuje přizpůsobit výkon čerpadla aktuálním potřebám.

Ovšem pro potřeby této práce je čerpadlo nastaveno na střední výkon, aby bylo docíleno konstantního průtoku kapaliny a je řízeno On/Off (zapnuto/vypnuto) regulací. Je-li na vstup přivedeno nulové napájecí napětí, čerpadlo je vypnuto. Pokud je na vstup připojeno nenulové napájecí napětí (230 V) čerpadlo je zapnuto.

2.1.6 Ohřívač vody

V modelu je pro ohřev vody použit zásobníkový ohřívač Ariston Ti Shape 10UR (Z1) o objemu 10 litrů a výkonu 2 kW.

2.1.7 Expanzní nádoba

V obou okruzích je umístěna expanzní nádoba s vyměnitelným vakem CIMM ACS (E1, E2), která má objem 5 l a maximální tlak 10 barů. Expanzní nádoba slouží k vyrovnání tlaku v soustavě a jako zásobník vody.

2.1.8 Snímač tlakové difference

Snímač tlakové difference BD Sensors DMD331 (P1) je umístěn v primárním okruhu. Základ snímače je tvořen piezorezistivním senzorem z nerezové oceli. Rozdíl tlaků mezi pozitivním a negativním vstupem senzoru je převáděn na analogový výstupní signál 4...20 mA.

2.1.9 Regulační ventil a servopohon

Pro regulaci průtoku vody jsou využity třístavné regulační ventily LBM RV 111 R (V1, V2, V3). Ovšem ventil V3 je opatřen záslepkou a slouží jako ventil dvoucestný. Ventily lze regulovat manuálně pomocí otočného kolečka umístěného na boku ventilu nebo lze kolečko odebrat a ventil regulovat pomocí servopohonu.

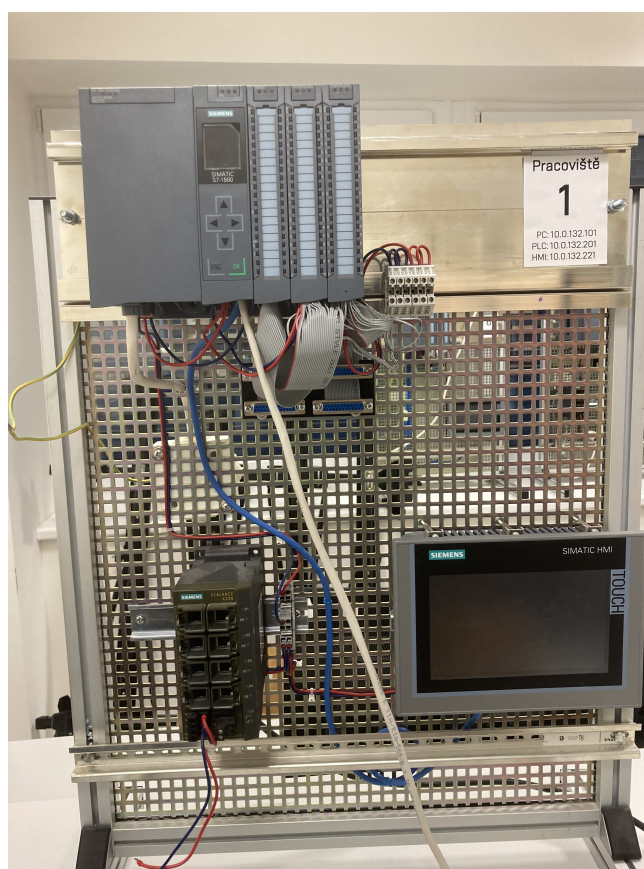
U tohoto modelu jsou ventily regulovány servopohony Siemens SSC61. Tyto servopohony jsou řízeny pomocí PLC napětovým analogovým výstupem 0...10 V. Doba přechodu servopohonu z minimální na maximální hodnotu je 30 s.

3 Řízení modelu výměňkové stanice

V této kapitole je popsáno výukové pracoviště, které bylo využito pro řízení modelu výměňkové stanice. Dále se zde nachází popis použitého vývojového prostředí a řídicího programu, včetně obrazovek určených pro ovládání a pozorování aktuálního stavu modelu výměňkové stanice. Celý program se nachází v příloze C na přiloženém USB flash disku. V posledním bodě této kapitoly je uveden postup měření modelu výměňkové stanice a měřicí scénáře jednotlivých průběhů.

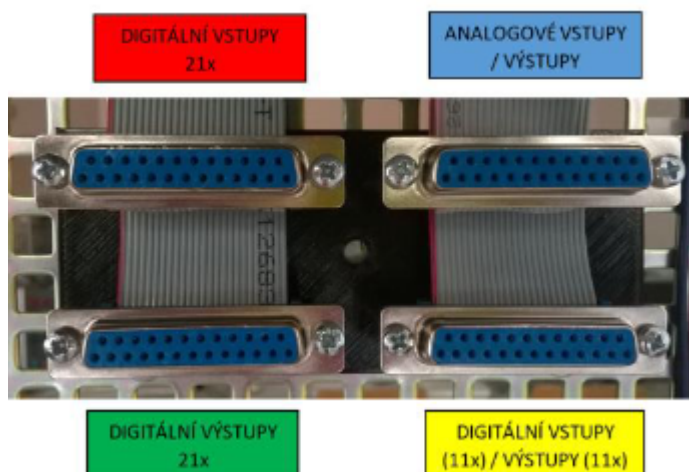
3.1 Výukové pracoviště

K řízení modelu výměňkové stanice byl využit výukový panel, který se nachází v laboratoři na Ústavu automatizace a měřicí techniky. Panel je vybaven programovatelným logickým automatem (PLC) od společnosti Siemens řady SIMATIC S7-1500 typ 1512C-1 PN, který byl využit pro řídicí program a dotykovým HMI (rozhraní člověk-stroj) panelem TP 700 Comfort od společnosti Siemens, který v této práci slouží pro ovládání a zobrazení stavu modelu výměňkové stanice.



Obr. 3.1: Pracoviště s PLC a HMI

Na výukovém panelu se také nacházejí konektory CAN25, které jsou umístěny přímo pod PLC. Na tyto konektory jsou vyvedeny vstupy a výstupy PLC karet. Pro snímání teploty a řízení ventilů je využit pravý horní konektor, ke kterému jsou připojeny analogové vstupy a výstupy PLC. Pro ovládání čerpadel, zásobníkového ohřívače vody a zachytávání pulzů z vodoměru je využit pravý dolní konektor, ke kterému jsou připojeny digitální vstupy a výstupy PLC.



Obr. 3.2: Konektory CAN25 [8]

3.2 Vývojové prostředí

Pro vytvoření řídicího programu bylo použito vývojové prostředí TIA Portal V17 od společnosti Siemens. Toto prostředí umožňuje psaní kódu v různých programovacích jazycích stanovených normou IEC EN 61131-3, které lze mezi sebou kombinovat. Dále umožňuje vytvoření vlastního rozhraní pro HMI panely, možnost nastavení vstupů a výstupů PLC a provádění měření a simulace.

3.3 Vstupy a výstupy

Namapování vstupních a výstupních proměnných na správné adresy vychází z předešlé bakalářské práce [7], která pojednávala o modelu výměníku.

Pro účely této bakalářské práce bylo ještě nutné dodat proudové relé, které slouží pro zjištění, zda-li je průtokový ohřívač vody zapnutý, či vypnutý. Upravené schéma z [7] je uvedeno v příloze B.

Nejprve je nutné pomocí funkce Device configuration, která se nachází ve vývojovém prostředí TIA Portal V17, nastavit vstupy a výstupy jednotlivých karet

PLC. Analogové vstupy byly nastaveny jako proudové (4-wire transducer) s rozsahem 4...20 mA. Analogové výstupy byly nastaveny jako napětové (Voltage) s rozsahem 0...10 V. Přehled vstupních proměnných PLC je uveden v tabulce 3.1 a přehled výstupních proměnných je uveden v tabulce 3.2.

Tab. 3.1: Vstupní proměnné PLC

Proměnná	Označení v modelu	Datový typ	Adresa
F_1	Vodoměr F1	Bool	%I12.6
F_2	Vodoměr F2	Bool	%I13.0
T_1	Teploměr T1	Int	%IW130
T_2	Teploměr T2	Int	%IW126
T_3	Teploměr T3	Int	%IW132
T_4	Teploměr T4	Int	%IW128
diBoilerRun	-	Bool	%I12.5

Tab. 3.2: Výstupní proměnné PLC

Proměnná	Označení v modelu	Datový typ	Adresa
V_1	Ventil V1	Int	%QW0
V_2	Ventil V2	Int	%QW2
C_1	Čerpadlo C1	Bool	%Q7.5
C_2	Čerpadlo C2	Bool	%Q7.7
B	Zásobníkový ohřivač Z1	Bool	%Q7.3

3.4 Použité programovací jazyky PLC

Pro řízení modelu výměníkové stanice jsou využity dva programovací jazyky dané normou IEC EN 61131-3, a to jazyky ST a FBD. Přehled všech jazyků této normy je uveden v tabulce 3.3.

Tab. 3.3: Jazyky normy IEC EN 61131-3

zkratka	název
LD	Ladder Diagram
FBD	Function Block Diagram
IL	Instruction List
ST	Structured Text
SFC	Sequential Function Chart

3.5 Program pro řízení modelu výměníkové stanice

V této kapitole jsou popsány jednotlivé části programu, které slouží pro sběr dat a řízení modelu výměníkové stanice a obrazovky určené pro ovládání a pozorování aktuálního stavu modelu výměníkové stanice.

3.5.1 Měření teploty

Teplota je měřena pomocí analogových vstupů PLC, které jsou nastaveny jako proudové (4...20 mA). Nejprve je vstupní hodnota znormalizována pomocí instrukce NORM_X, která je dostupná přímo v TIA portálu.

$$OUT = \frac{VALUE - MIN}{MAX - MIN} \quad (3.1)$$

Kde:

VALUE – vstupní analogová hodnota z PLC

MIN – minimální analogová hodnota

MAX – maximální analogová hodnota

OUT – výstupní hodnota NORM_X

Výstupní hodnota OUT je v rozmezí od 0 do 1, proto musí být ještě dopočítána skutečná hodnota teploty. Pro tento výpočet je použita další instrukce, která je dostupná v TIA portálu, a to instrukce SCALE_X.

$$OUT = VALUE(MAX - MIN) + MIN \quad (3.2)$$

Kde:

VALUE – výstupní hodnota NORM_X

MIN – minimální hodnota teploty

MAX – maximální hodnota teploty

OUT – výsledná teplota

3.5.2 Řízení ventilů

Hodnota otevření ventilů je nastavována pomocí analogových výstupů PLC, které jsou nastaveny jako napěťové (0...10 V). Pro nastavení této hodnoty jsou použity stejné instrukce, jako je tomu u měření teploty.

3.5.3 Ovládání akčních členů

Pro ovládání čerpadel a ohřívače vody jsou využity digitální výstupy PLC. Zapnutí a vypnutí akčních členů je zabezpečeno pomocí povolení, které musí být zapnuto, aby bylo možné akční členy nastavovat.

3.5.4 Výpočet průtoku

Pro výpočet průtoku jsou využity digitální vstupy PLC. Pro zachycení impulzu z vodoměru, který vodoměr vyše po každých 10 proteklých litrech, je využit hardwarový interrupt. Za pomoci počítání těchto pulzů lze vypočítat celkové proteklé množství vody.

Vzorec pro výpočet celkového proteklého množství vody:

$$V = n \cdot 10 \quad [l] \quad (3.3)$$

Kde:

V – celkové proteklé množství

n – počet impulzů

Díky přehledu o aktuálním proteklém množství lze spočítat rychlost proudění vody, která je počítána pomocí klouzavého průměru. Výpočet je prováděn každých 10 sekund z posledních 24 vzorků (1 vzorek = 10 s), tedy rychlost proudění vody za poslední 4 minuty.

Vzorec pro výpočet rychlosti proudění vody:

$$v = \frac{\sum_{i=1}^{24} (V_1 + V_2 + \dots + V_i)}{24} \quad [l \cdot s^{-1}] \quad (3.4)$$

Kde:

V – aktuální proteklé množství [l]

i – počet vzorků [-]

v – rychlost průtok [l · s⁻¹]

Nicméně v modelu je uvažován hmotnostní průtok, na který se lze přepočítat, pokud je uvažována konstantní hustotu protékaného média. Tabulková hustota vody je 997 kg/m³, ale pro zjednodušení je možné použít hodnotu 1000 kg/m³.

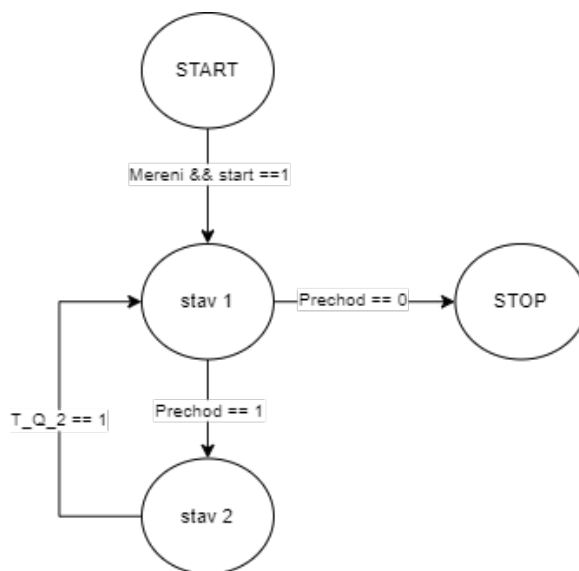
3.5.5 Program měření

Program měření slouží pro nastavení doby trvání jednotlivých přechodových jevů, které jsou měřeny a hodnot otevření ventilů V1 a V2 pro tyto přechodové děje. Jednotlivé přechody jsou reprezentovány stavovým automatem. Stavy měření jsou uloženy pomocí pole *SwitchTable[]*, kterému je předávána vlastní vytvořená struktura proměnných *SwitchRow*. *SwitchRow* obsahuje proměnnou pro nastavení času a proměnné pro otevření ventilů V1 a V2.

Program je zhotoven pomocí jednoduchého stavového automatu o dvou stavech. Pro inicializaci je zde použit přepínač "Mereni" a tlačítko "Start". Po splnění podmínky, kdy přepínač a tlačítko musí být nastaveny na hodnotu true, je proměnná *Prechod* nastavena na hodnotu true a dojde k přechodu do stavu 1.

Ve stavu 1 je provedena kontrola, zda-li je pro daný stav měření nastavena časová hodnota T ($T \neq 0$) a zároveň je provedena kontrola, jestli předešlý nastavený stav měření nebyl poslední možný ($increment \geq 20$). Maximální počet stavů měření je nastaven na hodnotu 20. Je-li splněna tato podmínka, je proměnná *Prechod* nastavena na hodnotu false, ventily V1 a V2 jsou nastaveny na hodnotu otevření 0 % a měření je ukončeno. V opačném případě jsou nastaveny ventily na hodnoty otevření, které jsou zadané pro daný stav měření a dojde k přechodu do stavu 2.

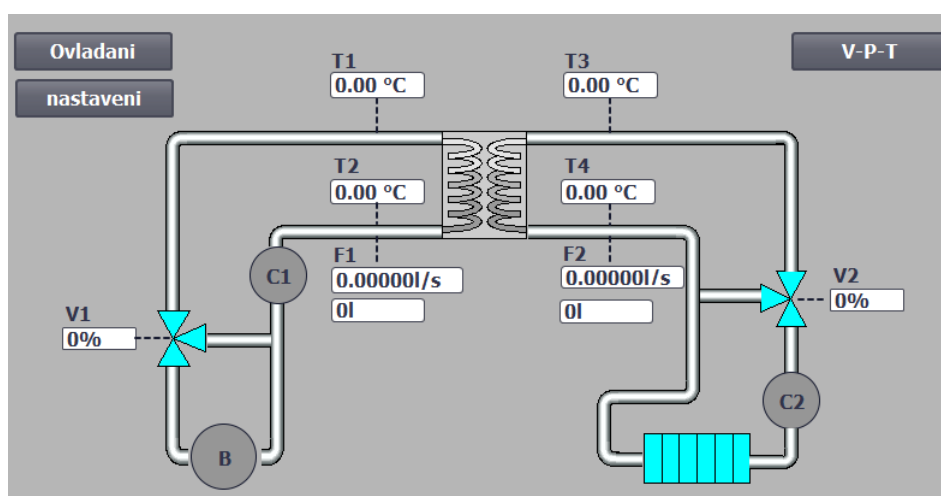
Ve stavu 2 je spuštěn časovač, kterému je přiřazen časový interval nastavený pro daný stav měření. Po skončení časovače dojde k posunu pozice v poli, ve kterém jsou uloženy stavy měření, o hodnotu 1 a je spuštěn druhý časovač s časovým intervalem 0,5 s, po jehož ukončení dojde k přechodu do stavu 1.



Obr. 3.3: Stavový automat programu měření

3.5.6 Hlavní obrazovka vzdáleného dohledu

Tato obrazovka ukazuje kompletní přehled stanice. Slouží pouze pro dispečerské pozorování aktuálních stavů stanice. Nachází se zde údaj o aktuální teplotě, celkovém proteklém množství a rychlosti proudění vody v obou okruzích, také se zde nachází ukazatel aktuálně nastavených hodnot otevření ventilů a aktivní ikony akčních členů, které znázorňují jejich stav - svítí-li ikona šedě, akční člen je vypnutý, svítí-li ikona zeleně, akční člen je zapnutý. V levé a pravé horní části obrazovky jsou umístěny tlačítka pro možnost přepnutí na ostatní obrazovky. Na dispečerské ovládání stanice jsou dedikovány další obrazovky.

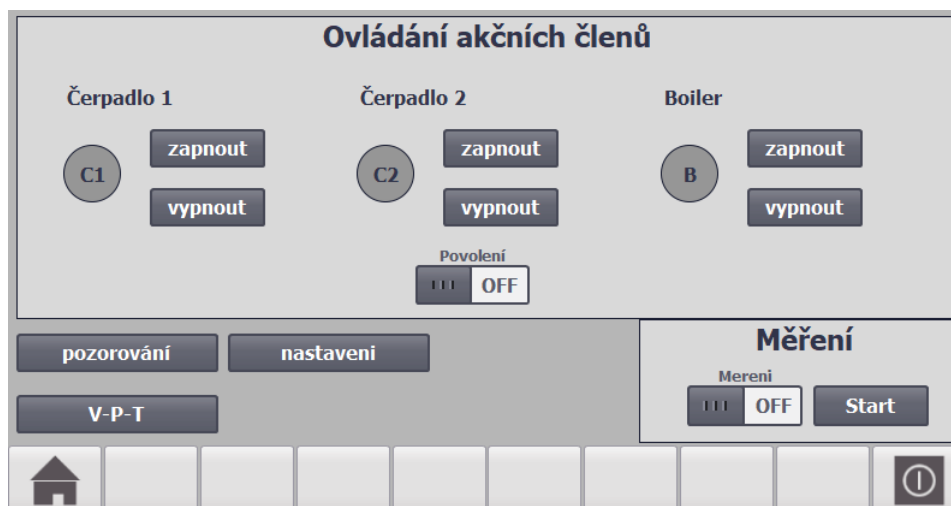


Obr. 3.4: Obrazovka vzdáleného dohledu

3.5.7 Obrazovka manuálního ovládání

Obrazovka slouží pro ruční ovládání akčních členů. Je zde umístěno ovládání obou čerpadel (C1, C2) a zásobníkového ohřívače (B). Přepínač "Povolení" slouží pro povolení přístupu k ovládání akčních členů. Tlačítka "zapnout" a "vypnout" slouží pro On/Off regulaci akčních členů. Vedle těchto tlačítek se nacházejí aktivní ikony informující o stavu akčních členů - svítí-li ikona šedě, akční člen je vypnutý, svítí-li ikona zeleně, akční člen je zapnutý.

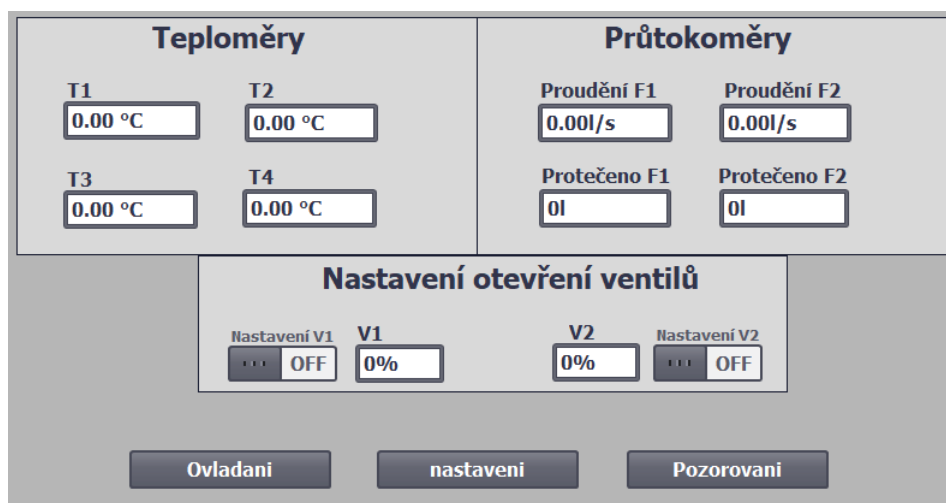
Tato obrazovka také zahrnuje tlačítka a přepínač pro nastavení měření. Přepínač "Mereni" slouží jako trigger pro spuštění nahrávání měření. Tlačítka "Start" je určeno ke spuštění programu určeného pro měření. V levé dolní části obrazovky jsou umístěna tlačítka pro možnost přepínání mezi jednotlivými obrazovkami.



Obr. 3.5: Obrazovka manuálního ovládání

3.5.8 Obrazovka ventily-průtokoměry-teploměry

Na obrazovce je umístěno manuální ovládání otevření ventilů (V1, V2). Pro povolení ovládání ventilů jsou zde umístěny dva přepínače (Nastavení V1, Nastavení V2), vedle těchto přepínačů jsou umístěna okénka pro zadání hodnot otevření ventilů v procentech. V levé horní části obrazovky se nachází údaje o aktuální teplotě (T1, T2, T3, T4) a v pravé horní části obrazovky údaje o celkovém proteklém množství a rychlosti proudění vody v obou okruzích (F1, F2) modelu výměňkové stanice. Pomocí tlačítek na dolní části obrazovky se lze přepnout na obrazovky pozorování, ovládání a nastavení stavů.



Obr. 3.6: Obrazovka ventily-průtokoměry-teploměry

3.5.9 Obrazovka nastavení měřicích scénářů

Obrazovka nastavení měřicích scénářů slouží pro nastavení jednotlivých stavů průběhu měření. Do kolonky T se zadává délka daného stavu v milisekundách. Do kolonek V1 a V2 se zadává hodnota otevření ventilů v daném stavu v procentech. Lze nastavit až 20 stavů měření. Je-li potřeba zadat menší počet stavů, musí být u nepoužitých stavů v kolonce T nastavena hodnota 0 milisekund.

	T [ms]	V1 [%]	V2 [%]		T [ms]	V1 [%]	V2 [%]
1	0	0	0	11	0	0	0
2	0	0	0	12	0	0	0
3	0	0	0	13	0	0	0
4	0	0	0	14	0	0	0
5	0	0	0	15	0	0	0
6	0	0	0	16	0	0	0
7	0	0	0	17	0	0	0
8	0	0	0	18	0	0	0
9	0	0	0	19	0	0	0
10	0	0	0	20	0	0	0

pozorování

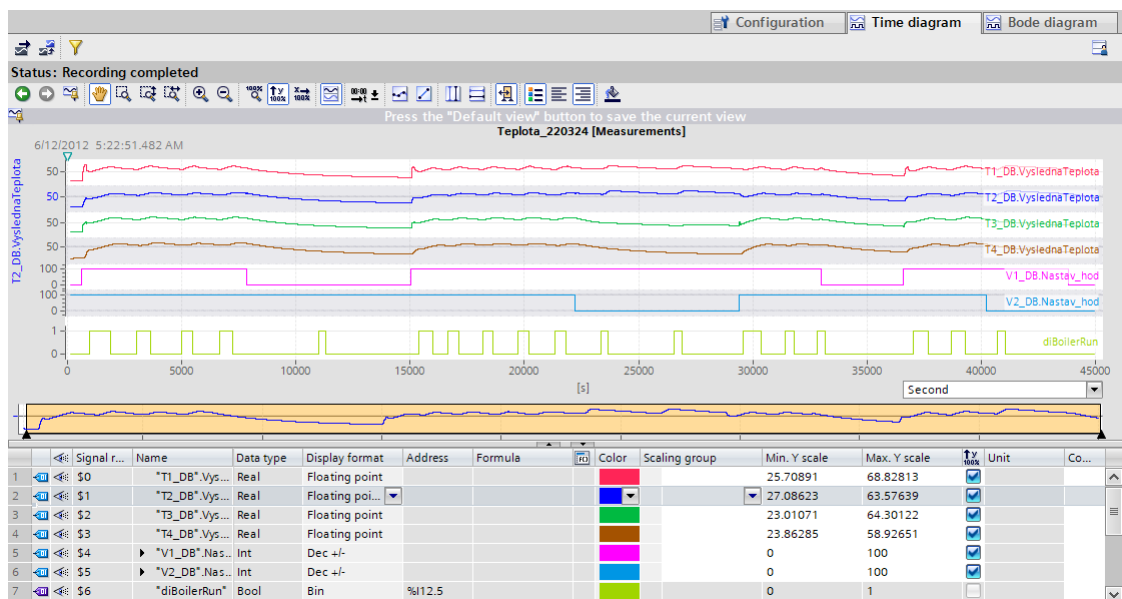
V-P-T

Ovládání

Obr. 3.7: Obrazovka nastavení měřicích scénářů

3.6 Měření

Pro měření modelu výměníkové stanice byla využita funkce Traces, která je vestavěna přímo v prostředí TIA Portal. Díky této funkci lze měřit signály v reálném čase přímo ve vývojovém prostředí bez potřeby jiných měřicích přístrojů. Signály, které budou měřeny, lze nakonfigurovat dle vlastního výběru. Pro potřeby této práce byly měřeny signály T1, T2, T3, T4, V1, V2 a diBoilerRun se vzorkovací periodou 5 sekund, která je realizována pomocí bloku "Mereni_5s"[OB31]. Jakožto trigger pro spuštění nahrávání byl použit přepínač "Mereni", který je umístěn na obrazovce ovládání. Na stejné obrazovce je také umístěno tlačítko "Start", pomocí kterého se zapíná cyklus měření. Příklad naměřených hodnot pomocí funkce Traces je uveden na obrázku 3.8.



Obr. 3.8: Příklad naměřených hodnot pomocí funkce Traces

3.6.1 Postup měření

Před začátkem každého měření je důležité zkontrolovat tlak vody v potrubí. Pro správnost měření je důležité, aby tlaky v primárním a sekundárním okruhu byly stejné (zvolený pracovní tlak je 50 kPa). Je-li tlak v okruhu nižší, je zapotřebí okruh natlakovat. Je-li tlak v okruhu vyšší, je potřeba okruh odpustit. Dále je nutné okruhy odvzdušnit.

Před spuštěním cyklu měření je nutné nahřát vodu v průtokovém ohřívači na požadovanou teplotu a zapnout čerpadla. Poté musí být spuštěn trigger pro záznam měřených hodnot pomocí přepínače "Mereni" a tlačítkem "Start" spuštěn cyklus měření. Jednotlivé měřicí scénáře jsou popsány v kapitole 3.6.2.

3.6.2 Měřicí scénáře

Tréninkový scénář a validační scénář 1 se skládají z devíti stavů. Ve stavu *Start*, aby se ustálily teploty v obou okruzích, je ventil V1 nastaven na hodnotu otevření 0 % a ventil V2 na 100 % po dobu 10 minut. Následně ve stavu jedna dojde k otevření obou ventilů na hodnotu 100 % po dobu 2 hodin. Ve druhém stavu je ventil V1 nastaven na hodnotu otevření 0 % po dobu 2 hodin. Otevření ventilu V2 zůstává stejné. Ve stavu 3 jsou opět ventily V1 a V2 otevřeny na 100 % po dobu 2 hodin. Ve stavu 4 dojde k uzavření ventilu V2 po dobu 2 hodin. Stavy 5, 6, 7 a 8 mají stejný průběh otevírání ventilů jako stavy 1, 2, 3 a 4, ovšem jejich doba trvání je poloviční. Ve stavu *Stop* jsou oba ventily nastaveny na hodnotu 0 % a cyklus měření

je ukončen. Po ukončení měřicího cyklu jsou ještě zaznamenávány hodnoty po dobu 20 minut, až po uplynutí této doby dojde k ukončení záznamu hodnot. Hodnoty otevření ventilů V1 a V2 v jednotlivých stavech jsou přehledněji uvedeny v tabulce 3.4.

Tab. 3.4: Stavy tréninkového a 1. validačního scénáře měření

Stav	Čas [min]	$V1(t)$ [%]	$V2(t)$ [%]
Start	0	0	100
1	10	100	100
2	130	0	100
3	250	100	100
4	370	100	0
5	490	100	100
6	550	0	100
7	610	100	100
8	670	100	0
Stop	730	0	0

Otevírání ventilů v jednotlivých stavech validačního scénáře 2 bylo náhodně vygenerováno pomocí MATLAB funkce *randi*. Stavy *Start*, 8 a 9 byly doplněny ručně. Stav *Start* zde slouží též pro ustálení teploty v okruzích. Stavy 8 a 9 byly použity pro vyobrazení přechodu mezi úplným uzavřením a maximálním otevřením ventilů. Kompletní přehled stavů validačního scénáře měření je uveden v tabulce 3.5.

Tab. 3.5: Stavby 2. validačního scénáře měření

Stav	Čas [min]	$V1(t)$ [%]	$V2(t)$ [%]
Start	0	0	100
1	10	65	20
2	100	38	30
3	190	81	47
4	280	53	23
5	370	35	85
6	460	94	19
7	550	22	88
8	640	0	0
9	730	100	100
10	820	55	17
11	910	22	62
Stop	1000	0	0

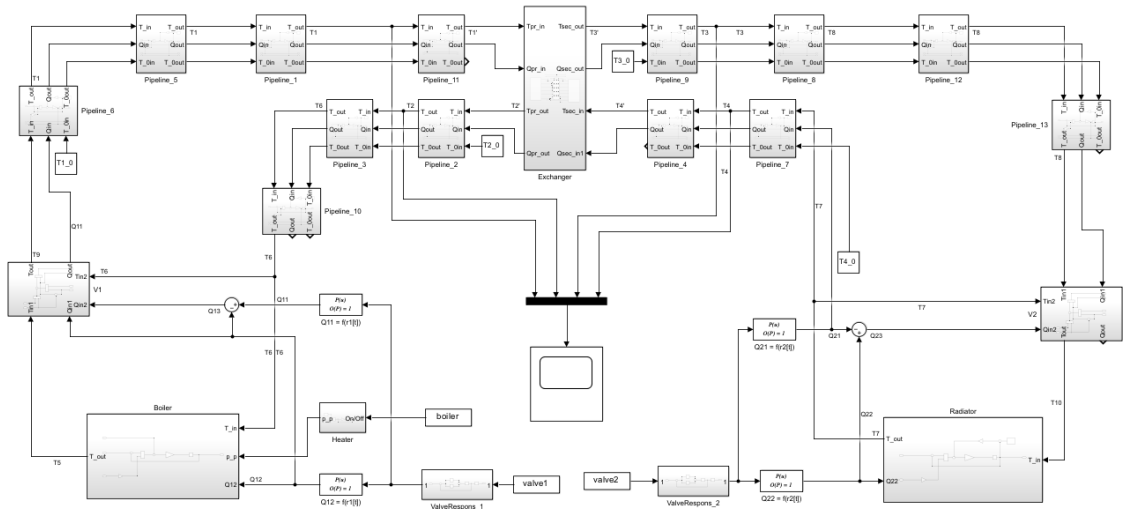
4 Simulace

Účelem simulace je co nejpřesněji napodobit model reálného systému, abychom mohli tento systém zkoumat a pochopit jeho chování.

4.1 Simulační model v prostředí MATLAB Simulink

Práce volně navazuje na předchozí bakalářské práce [7] a [9]. Úkol zde uvedených prací byl stejný, nicméně publikovaný model nedosahoval dobrých výsledků, a proto byl po konzultaci s vedoucím práce zvolen jiný přístup k modelování.

Pro vytvoření simulačního modelu bylo použito vývojové prostředí MATLAB, ve kterém jsou provedeny numerické výpočty a naprogramovány potřebné funkce, a vývojové prostředí MATLAB Simulink, které bylo použito pro návrh modelu systému. Vytvořený model systému je vyobrazen na obrázku 4.1.



Obr. 4.1: Simulační model v prostředí MATLAB Simulink

Systémy bez dynamiky nebo se zanedbatelnou dynamikou, jako jsou ventily, jsou popsány pomocí lineárních nebo nelineárních statických modelů. Tepelné subsystémy jako (např. ohříváč vody, topné těleso, radiátor) jsou charakterizovány lineárními dynamickými modely. Jako sofistikovanější přístup k modelování byla využita tzv. metoda konečných diferencí (MKD). Metoda konečných diferencí patří mezi nejjednodušší numerické metody pro řešení parciálních diferenciálních rovnic. MKD je více popsána v kapitole 4.1.2.

Parametry dílčích modelů jednotlivých prvků jsou určeny na základě naměřených dat. To by ovšem znamenalo identifikovat stovky parametrů (a při jemnějším dělení

MKD mnohem více). Aby hledání optimálních parametrů nebylo příliš komplikované, jsou jednotlivé parametry použity pro všechny dílčí modely MKD. Sdílené parametry jsou využity pro modely protiproudého výměníku tepla a pro systém potrubí.

4.1.1 Matematický model - obecné rovnice

V této kapitole se nachází obecný popis rovnic, ze kterých jsou následně složeny jednotlivé modely prvků výměníkové stanice. Rovnice vycházejí z kalorimetrické rovnice a zákona zachování tepelné energie [14][15].

Rovnice odvodu tepla do okolí

Jedná se o rovnici, která značí, kolik tepelné energie ve wattech je předáno skrze izolaci do okolí.

$$p_u(t) = -b [T_{out}(t) - T_a] \quad (4.1)$$

Kde:

T_a – teplota okolí	[°C]
$T_{out}(t)$ – výstupní teplota prvku	[°C]
b – tepelná vodivost prvku	[W·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]

Teplota okolí byla stanovena na hodnotu 24 °C. Této stálé teploty bylo docíleno pomocí klimatizačního systému umístěného v místnosti.

Výsledná hodnota by teoreticky měla být $p_u(t) < 0$, jelikož teplo uniká do okolí.

Tepelný příkon

Model výměníkové stanice pro přísun tepla využívá průtokový ohřívač vody, který je řízen pomocí vlastní dvoustavové regulační smyčky ve formě bi-metalové regulace přehřátí. Správné načasování spínání je těžké určit z průběhů měřených teplot a tento stav nelze snadno odhadnout. Proto byl výkon použit v modelu průtokového ohřívače vody.

$$p_p(t) = \begin{cases} P & \text{Napájení je zapnuté} \\ 0 & \text{Napájení je vypnuté} \end{cases} \quad (4.2)$$

Tepelný příkon byl využit pouze pro model ohřívače vody, jelikož ostatní prvky modelu výměníkové stanice nevyužívají žádné topné těleso.

Výkon přiváděný vtékající vodou

Jedná se o teplo dodané vodou v důsledku rozdílu teplot mezi vstupním a výstupním potrubím.

$$p_v(t) = c Q [T_{in}(t) - T_{out}(t)] \quad (4.3)$$

Kde:

c – měrná tepelná kapacita média	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$
Q – hmotnostní průtok	$[\text{l} \cdot \text{s}^{-1}]$
$T_{in}(t)$ – vstupní teplota prvku	$[^{\circ}\text{C}]$
$T_{out}(t)$ – výstupní teplota prvku	$[^{\circ}\text{C}]$

Model výměníkové stanice je naplněn vodou (H_2O). Pro zjednodušení je uvažována běžně používaná konstantní hodnota měrné tepelné kapacity vody, tedy $c = 4180 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$.

V praxi je vždy $T_{in}(t) < T_{out}(t)$, proto $p_v(t) < 0$.

Kalorimetrická rovnice

Výše uvedené rovnice lze zapsat pomocí následující společné rovnice:

$$m c T'_{out}(t) = p_u(t) + p_p(t) + p_v(t) \quad (4.4)$$

Kde:

m – hmotnost vody v prvku	$[\text{kg}]$
$T'_{out}(t)$ – první derivace výstupní teplota prvku	$[^{\circ}\text{C}]$

Po dosazení do rovnice 4.4 dostaneme následující tvar:

$$m c T'_{out}(t) = -b [T_{out}(t) - T_a] + p_p(t) + c Q [T_{in}(t) - T_{out}(t)] \quad (4.5)$$

Pomocí obecné rovnice 4.5 lze namodelovat libovolné jednotlivé modely výměníkové stanice. Je předpokládáno, že se voda v jednotlivých namodelovaných prvcích dokonale promíchá, a proto je lze popsat jednou společnou teplotou $T_{out}(t)$. Členy pravé strany jsou využity v závislosti na modelovaném prvku. Ne všechny členy pravé strany jsou v jednotlivých modelech využity.

4.1.2 Metoda konečných diferencí

Metoda konečných diferencí (MKD) je jednou z nejpoužívanějších numerických metod pro řešení diferenciálních rovnic. Hojně se využívá pro modelování proudění tekutin a vedení tepla. Jedná se o numerickou metodu, pomocí které jsou řešeny různé fyzikální problémy. Princip MKD je založen na diskretizaci prostoru a času, čímž je fyzikální problém rozdělen na konečný počet bodů v prostoru a čase. MKD je značně podobná metodě konečných prvků (MKP). Jejich společným znakem je rozklad systémů na velké množství prvků (bodů). Tyto prvky mají svůj vlastní jednoduchý matematický a geometrický popis. Vzájemné působení jednotlivých prvků je řešeno pomocí matematických rovnic a numerických metod, díky čemuž lze získat přesné výsledky.

Simulace, ve které je využita MKD, dává možnost různých testovacích scénářů a změny parametrů, tím lze dosáhnout vysoké efektivity, zlepšení výkonu a spolehlivosti systémů. MKD umožňuje virtuální testování a analýzu, čímž dochází ke snížení nákladů za fyzické prototypy a experimenty. Také snižuje časovou náročnost vývoje a výroby nových produktů.

Pro správné použití MKD je velmi důležité správně definovat vstupní parametry jako materiálové vlastnosti a okrajové podmínky. Jsou-li tyto hodnoty nedefinovány nesprávně, nebude dosaženo správných výsledků. Velkou nevýhodou MKD je velká výpočetní náročnost a je prakticky nemožné ji použít bez výpočetní techniky. MKD je efektivní nástroj pro modelování a simulaci fyzikálních jevů, což umožňuje detailnější zkoumání různých scénářů, parametrů a optimalizaci vlastností systému [16][17].

Potrubí lze popsat parciální diferenciální rovnicí, která obsahuje parciální derivace teploty podle času a prostorové souřadnice podél délky potrubí. Taková rovnice má analytické řešení jen ve speciálních případech, a proto je pro obecnou situaci nutné rovnici v prostorových souřadnicích diskretizovat. Diskretizaci lze provést metodou konečných diferencí. Diskrétní části v prostorové souřadnici následně můžeme modelovat pomocí jednoduchého dynamického modelu prvního řádu. Ovšem je-li naskládáno více systémů prvního řádu za sebe, tak již celkový systém není prvního řádu, ale systém n -tého řádu, kde každý model má dva parametry viz. obrázek 4.6. Prvky mají konstantní velikost a stejný model, a proto lze uvažovat, že parametry jsou totožné. Díky tomu je možné identifikovat pouze dva parametry namísto N parametrů [18].

4.1.3 Model protiproudého výměníku

Hlavní součástí termodynamického fyzikálního modelu je výměník tepla. Jednoduchým matematickým popisem obecného chování výměníku jsou dva oddělené vodní prvky, stejně jako tomu je u prvků potrubí se vzájemným vztahem. Rozhraní mezi dvěma komorami je považováno za ideální s konstantním součinitelem přenosu tepla.

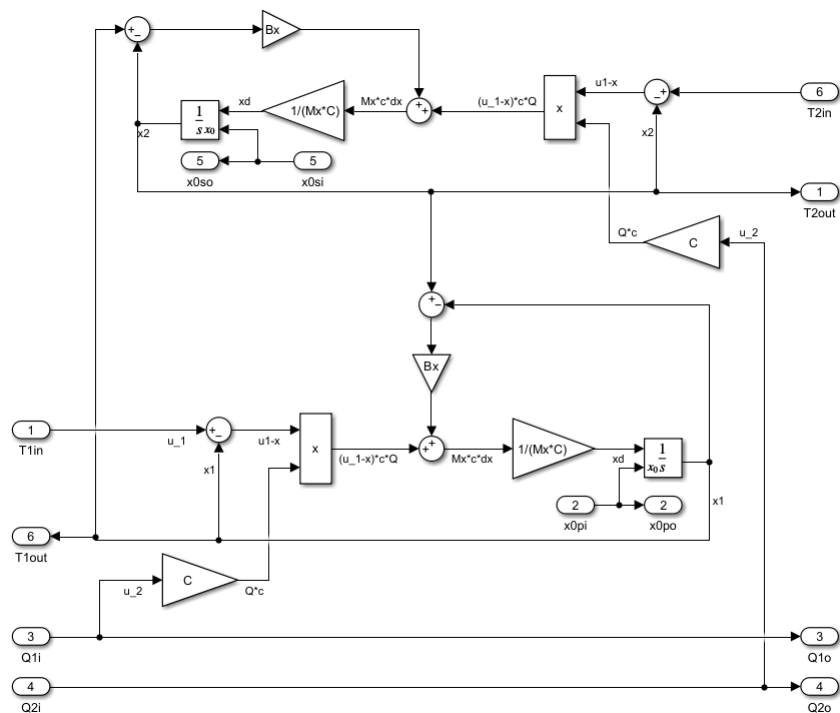
Výměník je namodelován pomocí metody konečných diferencí, která se hojně využívá pro modelování proudění tekutin a vedení tepla (viz. kapitola 4.1.2). Důvodem zvolení této metody bylo zpřesnění simulace. Výměník umístěný na výměníkové stanici je protiproudého typu. To znamená, že výstupní teplota vody v sekundárním okruhu je ohřívána vstupní teplotou vody primárního okruhu. Proto výstupní teplota vody v sekundárním okruhu může být vyšší než výstupní teplota vody v okruhu primárním. Protiproudé uspořádání výrazně zvyšuje účinnost výměníku a lze jej ve zjednodušené formě popsat pomocí následujícího dvoustavového modelu.

$$m c T'_{1out}(t) = c Q_{1i} [T_{1in}(t) - T_{1out}(t)] + B_x [T_{2out}(t) - T_{1out}(t)] \quad (4.6a)$$

$$m c T'_{2out}(t) = c Q_{2o} [T_{2in}(t) - T_{2out}(t)] + B_x [T_{1out}(t) - T_{2out}(t)] \quad (4.6b)$$

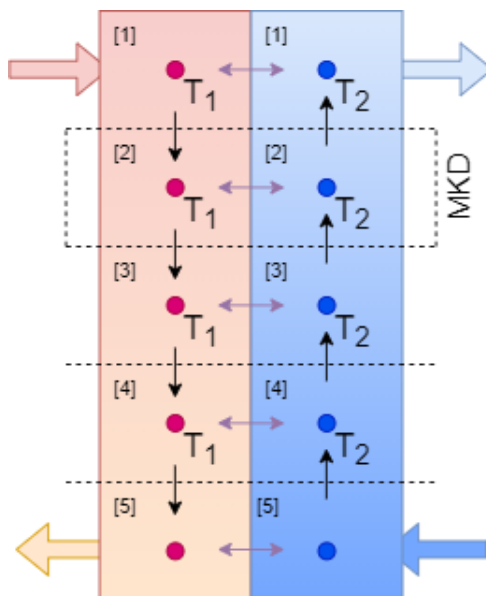
Kde:

T_{1in} – teplota na vstupu výměníku v primárním okruhu	[°C]
T_{2in} – teplota na vstupu výměníku v sekundárním okruhu	[°C]
T_{1out} – teplota na výstupu výměníku v primárním okruhu	[°C]
T_{2out} – teplota na výstupu výměníku v sekundárním okruhu	[°C]
B_x – tepelná vodivost výměníku	[W·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]
Q_{1i} – průtok výměníkem v primárním okruhu	[l · s ⁻¹]
Q_{2o} – průtok výměníkem v sekundárním okruhu	[l · s ⁻¹]
c – měrná tepelná kapacita média	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]



Obr. 4.2: Model výměníku tepla

Parciální diferenciální rovnice výměníku byly diskretizovány pomocí MKD. Na obrázku 4.3 jsou znázorněny prvky protiproudého výměníku tepla vzniklé pomocí této metody. Jeden diskretní prvek je znázorněn pomocí přerušovaného obdélníku. Teploty T_1 a T_2 jsou navzájem ovlivňovány dle rovnic 4.6a a 4.6b.



Obr. 4.3: Schéma MKD protiproudého výměníku tepla

4.1.4 Model ohříváče vody

Parametr P se může lišit od hodnoty udávané výrobcem, jelikož je zanedbána dynamika topného článku a jeho pouzdra. Proto byl příkon filtrován pomocí dynamického systému prvního řádu 4.7.

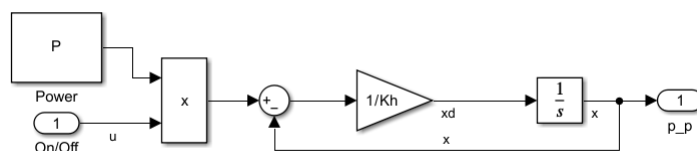
$$p'_b(t) = \frac{1}{K_h} [p_p(t) - p_b(t)] \quad (4.7)$$

Kde:

$p_p(t)$ – elektrický příkon

$p_b(t)$ – ekvivalentní výkon, který je rozptýlen ve vodě

K_h – časová konstanta topného tělesa [s]



Obr. 4.4: Dynamika průtokového ohříváče vody

Odvod tepla do okolí není využitý v modelu ohříváče vody, jelikož ohříváč vody je dobře zaizolovaný a odvod tepla do okolí by měl být zanedbatelně malý. Proto je u tohoto modelu $b = 0$ a rovnici 4.5 lze upravit následovně.

$$m_b c T'_{out}(t) = p_p(t) + c Q_{12} [T_{in}(t) - T_{out}(t)] \quad (4.8)$$

Kde:

$p_p(t)$ – tepelný příkon průtokového ohříváče vody [W]

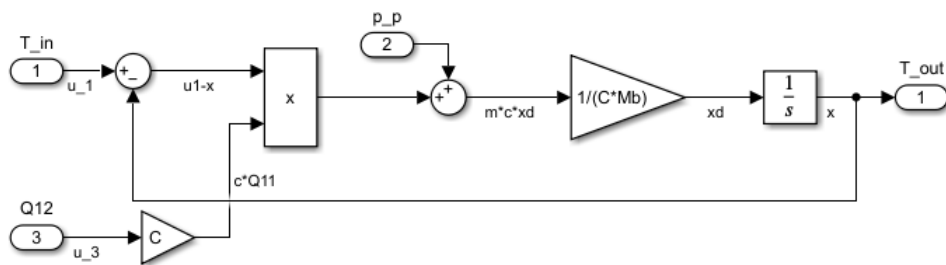
$T_{in}(t)$ – vstupní teplota průtokového ohříváče vody [°C]

$T_{out}(t)$ – výstupní teplota průtokového ohříváče vody [°C]

m_b – hmotnost vody v průtokovém ohříváči [kg]

Q_{12} – průtok ohříváčem vody [$l \cdot s^{-1}$]

c – měrná tepelná kapacita média [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]



Obr. 4.5: Model průtokového ohříváče vody

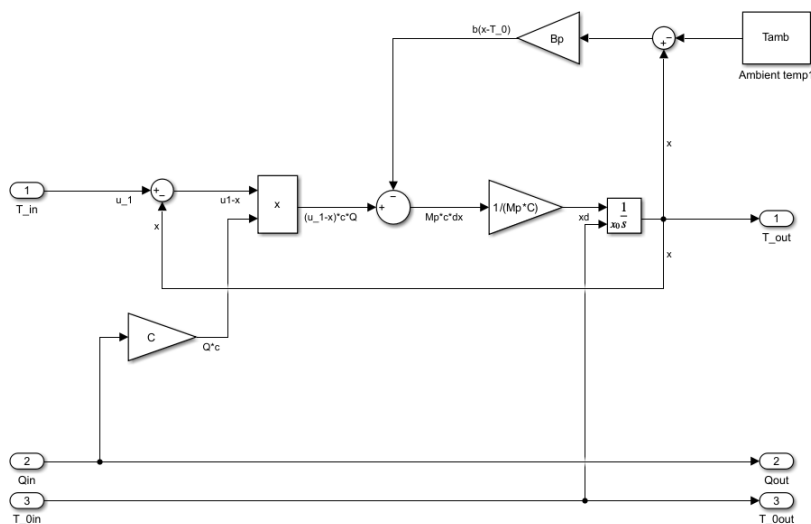
4.1.5 Model potrubí

Potrubí, stejně jako výměník, je namodelováno pomocí metody konečných diferencí. Pro model potrubí byla rovnice 4.5 upravena následovně.

$$m_p c T'_{out}(t) = -b_p [T_{out}(t) - T_a] + c Q [T_{in}(t) - T_{out}(t)] \quad (4.9)$$

Kde:

m_p – hmotnost vody v potrubí	[kg]
$T_{in}(t)$ – vstupní teplota potrubí	[°C]
$T_{out}(t)$ – výstupní teplota potrubí	[°C]
T_a – teplota okolí	[°C]
Q – průtok potrubím	[l · s ⁻¹]
b_p – tepelná vodivost potrubí	[W·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]
c – měrná tepelná kapacita média	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]



Obr. 4.6: Model potrubí

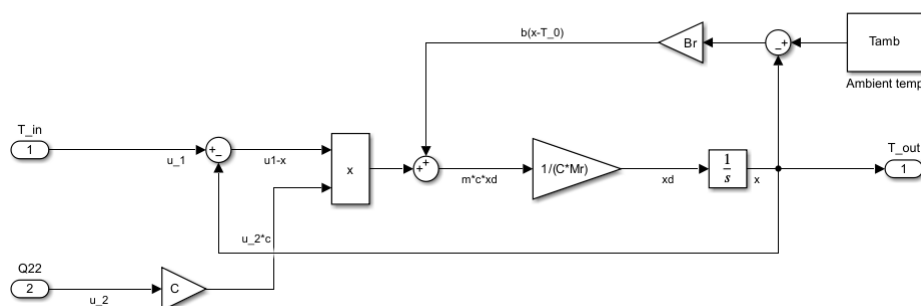
4.1.6 Model radiátoru

Radiátor má velký odvod tepla do okolí, ale nemá žádný člen pro přívod tepla. Proto je z pravé strany rovnice 4.5 vynechán parametr p_p a rovnice má následující tvar.

$$m_r c T'_{out}(t) = -b_r [T_{out}(t) - T_a] + c Q_{22} [T_{in}(t) - T_{out}(t)] \quad (4.10)$$

Kde:

m_r – hmotnost vody v radiátoru	[kg]
$T_{out}(t)$ – výstupní teplota radiátoru	[°C]
$T_{in}(t)$ – vstupní teplota radiátoru	[°C]
T_a – teplota okolí	[°C]
Q_{22} – průtok radiátorem	[l · s ⁻¹]
b_r – tepelná vodivost radiátoru	[W · kg ⁻¹ · K ⁻¹]
c – měrná tepelná kapacita média	[J · kg ⁻¹ · K ⁻¹]



Obr. 4.7: Model radiátoru

4.1.7 Model ventilu

Modely třicestných ventilů V1 a V2 byly namodelovány jako statický systém s ideálním míšením výstupní kapaliny. Předpokládá se, že součet všech průtoků je nulový. To vede k následujícím dvěma lineárním rovnicím 4.11 a 4.12.

$$T_{out} = \frac{T_{in1}Q_{in1} + T_{in2}Q_{in2}}{Q_{in1} + Q_{in2}} \quad [°C] \quad (4.11)$$

$$Q_{out} = Q_{in1} + Q_{in2} \quad [l \cdot s^{-1}] \quad (4.12)$$

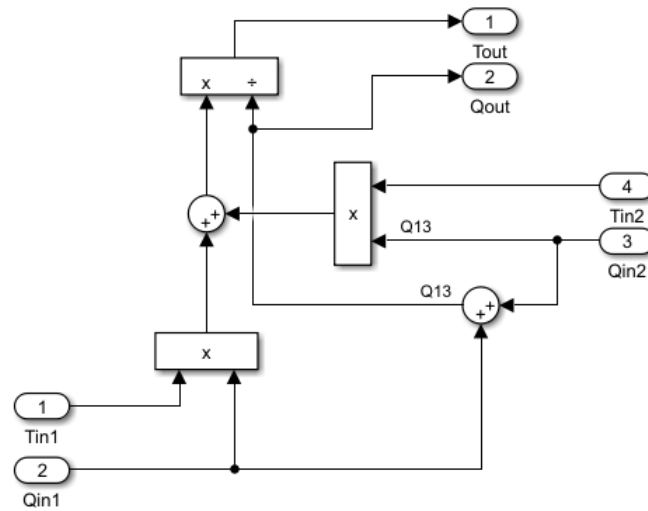
Kde:

T_{in1} – vstupní teplota 1	[°C]
T_{in2} – vstupní teplota 2	[°C]
T_{out} – výstupní teplota	[°C]
Q_{in1} – vstupní průtok 1	[l · s ⁻¹]

Q_{in2} – vstupní průtok 2 $[l \cdot s^{-1}]$
 Q_{out} – výstupní průtok $[l \cdot s^{-1}]$

Ventil představuje nádrž o nekonečně malém objemu, ve kterém se ideálně mísí dvě kapaliny o různých teplotách. Je uvažován zákon zachování tepelné energie, a proto je množství tepla neměnné.

Výstupní teplota T_{out} ideálního trojcestného ventilu se považuje za vážený průměr vstupních teplot T_{in1} , T_{in2} vážených vstupními průtoky Q_{in1} , Q_{in2} .



Obr. 4.8: Model ventilu

Průtoky Q_{in1} a Q_{in2} jsou závislé na hodnotě otevření ventilů $V_1(t)$ a $V_2(t)$. Momentálně lze získat pouze statické charakteristiky průtoků v primárním a sekundárním okruhu (Q_{11} a Q_{21} - viz. obrázek 2.2), jelikož pro měření průtoků jsou dostupné pouze dva vodoměry F1 a F2. Průtoky v ostatních částech potrubí jsou odhadnuty pomocí rovnice 4.12 a podle polohy čerpadel v okruzích. Výpočet jednotlivých průtoků je uveden v následujících rovnicích:

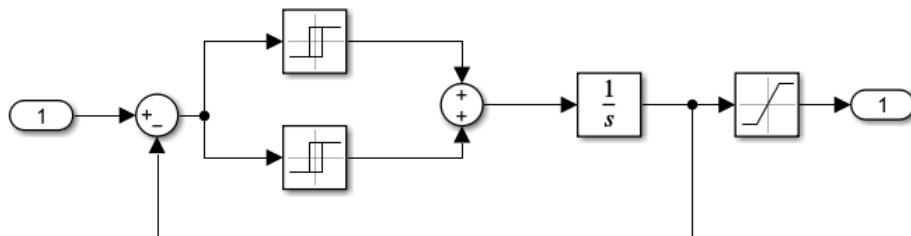
$$Q_{11}(t) = [0,0092 - 0,004 \cdot V_1(t)] \quad [l \cdot s^{-1}] \quad (4.13a)$$

$$Q_{12}(t) = 0,0052 \cdot V_1(t) \quad [l \cdot s^{-1}] \quad (4.13b)$$

$$Q_{21}(t) = 0,0061 \cdot V_2(t) \quad [l \cdot s^{-1}] \quad (4.13c)$$

$$Q_{22}(t) = [0,0102 - 0,004 \cdot V_2(t)] \quad [l \cdot s^{-1}] \quad (4.13d)$$

Odezva ventilu je namodelována pomocí dvoustavových relé s hysterezí, které jsou zapojeny jako zpětnovazební systém prvního řádu, a pomocí bloku saturace. Důvodem tohoto zapojení je, aby ventily byly otevírány postupně po dobu 30 sekund, a ne jako skoková odezva.



Obr. 4.9: Odezva ventilu

4.2 Metody pro odhad parametrů modelu

Optimalizace je proces, při kterém dochází k hledání neoptimálnějšího řešení daného problému. Optimalizace, jakožto matematická disciplína, slouží pro hledání extrémů dané funkce $f(x)$ a dané množiny M [25].

Optimalizaci lze rozdělit na lokální a globální.

Lokální optimalizace – hledá se nejbližší minimum, do kterého je možné sestoupit ze vstupního bodu.

Globální optimalizace – hledá se nejhlubší minimum intervalu [26].

Optimalizační metody lze rozdělit na derivační metody (gradientní metody) a nederivační metody (bez gradientní metody).

Gradientní metody

Gradientní metody při hledání využívají výpočet či odhad gradientu. Jedná se o deterministické metody, tedy pro stejné zadání je vždy stejný výsledek. U těchto metod hodnoty proměnných iterativně postupují z počátečních hodnot k hodnotám optimálním a jejich výsledkem je vždy lokální extrém.

Gradientní metody využívají pro hledání extrémů funkce první a druhou derivaci. Základním požadavkem na optimalizovanou funkci je, aby byla hladká a spojitá a její druhá derivace také musí být spojitá.

Metody lze rozdělit na metody prvního řádu a druhého řádu. Metody prvního řádu vyžadují hodnoty účelové funkce a hodnoty první derivace. Metody druhého řádu vyžadují hodnoty účelové funkce a hodnoty první a druhé derivace.

Velmi důležitým vstupním parametrem je zvolený startovní bod, jelikož pro nalezení globálního extrému funkce musí tento bod být zároveň součástí části prostoru

lokálního extrému. Další možné dělení je na metody jednorozměrné, vícerozměrné s omezením a vícerozměrné bez omezení [23][24].

Mezi gradientní metody patří například Quasi-Newtonova metoda a Trust region metoda, které využívá MATLAB funkce *fminunc* 4.2.1.

Metody bez gradientu

Tyto metody nevyužívají derivace minimalizovaných funkcí ani aproximace derivací, ale vyžadují pouze hodnoty účelové funkce. Bez gradientní metody jsou také nazývány jako metody nultého řádu nebo metody přímého vyhledávání.

Jedná se o metody globální optimalizace. Tedy o metody, které dokáží nalézt globální extrém funkce. Výhodou těchto metod je snadná implementace a technická realizace. Nederivační metody jsou děleny stejně jako ty gradientní na jednorozměrné a vícerozměrné [22][24].

Mezi bez gradientní metody patří například Nelder-Mead simplexová metoda, která je využívána MATLAB funkcí *fminsearch* 4.2.2 nebo genetické algoritmy, které využívá MATLAB funkce *GA* 4.2.4.

4.2.1 Funkce *Fminunc*

Funkce *fminunc* vyhledává minimum funkce více proměnných. Funkce požaduje jako vstupní veličinu vektor nebo matici, a jako výsledek vrací skalární hodnotu. Tato funkce má velice podobný zápis jako funkce *fminsearch*, ovšem pro vyhledávání minima jsou používány jiné algoritmy. Konkrétně se jedná o algoritmus Quasi-Newton a algoritmus Trust Region [12].

4.2.2 Funkce *Fminsearch*

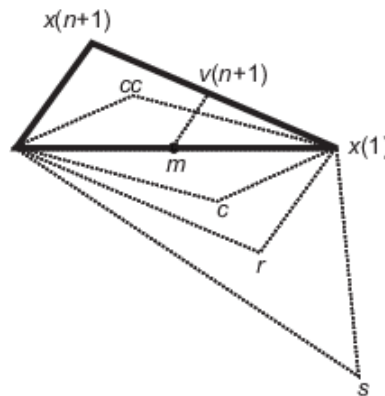
Funkce *fminsearch* slouží pro hledání minima skalární funkce několika proměnných. Minimum je hledáno pomocí počátečního odhadu, což je obecně označováno jako neomezená nelineární optimalizace. Funkce dokáže minimalizovat a vracet pouze reálná čísla. Je-li číslo komplexní, musí být rozděleno na reálnou a imaginární část. Jestliže funkce nemůže najít řešení, může pracovat nespojitě. Tomuto problému se lze vyhnout tím, že nastavíme vrácenou hodnotu funkce na vysokou hodnotu.

Funkce *fminsearch* pro hledání minima využívá Nelder-Mead simplexní algoritmus. Pro n -rozměrné vektory využívá Nelder-Mead algoritmus simplex $n+1$ bodů. Nejprve je vytvořen simplex kolem počátečního odhadu x_0 přidáním 5 % každé složky $x_0(i)$ k x_0 [10].

Simplex je poté upravován následovně:

1. Označení bodů v aktuálním simplexu $x(i)$, ($i = 1, \dots, n+1$).
2. Uspořádání bodů simplexu od nejnižší funkční hodnoty $f(x(1))$ po nejvyšší funkční hodnotu $f(x(n+1))$. V každém kroku iterace je vyřazen nejhorší bod a přidán další bod do simplexu.
3. Vygenerování odraženého bodu $r = 2m - x(n+1)$, $m = \sum \frac{x(i)}{n}$.
4. Reflect - jestliže $f(x(1)) \leq f(r) < f(x(n))$, je přijato r a iterace je ukončena.
5. Jestliže $f(r) < f(x(1))$, je vypočítán bod $s = m + 2(m - x(n+1))$ a $f(s)$.
Expand - pokud $f(r) < f(x(1))$, je přijato s a iterace je ukončena.
Reflect - pokud podmínka $f(r) < f(x(1))$ není splněna, je přijato r a iterace je ukončena.
6. Pokud $f(r) \geq f(x(n))$, je provedena kontrakce mezi m a $x(n+1)$ nebo r , podle toho, která má nižší hodnotu objektivní funkce.
Contract outside - pokud $f(r) < f(x(n+1))$, $c = m + (r - m)/2$ a je proveden výpočet $f(c)$, pokud $f(c) < f(r)$, je přijato c a iterace je ukončena, v opačném případě se pokračuje na krok 7.
Contract inside - pokud $f(r) \geq f(x(n+1))$, $cc = m + (x(n+1) - m)/2$ a je proveden výpočet $f(cc)$, pokud $f(cc) < f(x(n+1))$, je přijato cc a iterace je ukončena, v opačném případě se pokračuje na krok 7.
7. Shrink - je vypočítáno n bodů $v(i) = x(1) + (x(i) - x(1))/2$ a je proveden výpočet $f(v(i))$, $i = 2, \dots, n+1$, simplex další iterace je $x(1), v(2), \dots, v(n+1)$ [11].

Na obrázku 4.10 jsou vyobrazeny body, které *fminsearch* může v iteraci vypočítat s každým novým simplexem. Původní simplex je vyznačen tučně. Dokud není splněno kritérium zastavení, iterace pokračují.



Obr. 4.10: Ukázka bodů, které může *fminsearch* vypočítat [11]

4.2.3 System Identification Toolbox

System Identification Toolbox je určen pro identifikaci matematických modelů dynamických systémů z naměřených vstupních a výstupních parametrů systému v časové nebo frekvenční oblasti. Model může být reprezentován jak spojitou, tak i diskrétní časovou formou.

Pro identifikaci systému lze použít takzvaný black-box princip. Tento princip se využívá, je-li zapotřebí přizpůsobit data bez ohledu na matematickou strukturu soustavy. Tato metoda je označována jako pokus-omyl, jelikož spočívá v odhadu parametrů struktur a porovnání výsledků. Začíná se s jednoduchou strukturou lineárního modelu a postupně se postupuje ke složitějším strukturám.

Dalším možným způsobem identifikace je princip gray-box, který spočívá v odhadu parametrů modelu na základě naměřených dat. Strukturu modelu si uživatel volí na základě známých fyzikálních principů. Pro kontrolu, zda-li je struktura modelu správná, může uživatel navrhnout více modelů a vybrat ten, který nejvíce odpovídá výchozím datům [13].

4.2.4 Funkce GA

Funkce *GA* slouží pro řešení hladkých a nehladkých optimalizačních problémů s libovolnými typy omezení, včetně celočíselných. Ve výchozím stavu funkce je použit rozšířený Lagrangeův genetický algoritmus (ALGA), který řeší nelineární optimalizační problém za pomoci nelineárních omezení, lineárních omezení a hranic. Lineární omezení a hranice jsou řešeny odděleně od nelineárních omezení. Dílčí problémy při řešení kombinují fitness funkci a nelineární omezující funkce pomocí Lagrangeova a penalizačních parametrů [19][20].

Jednotlivé kroky genetického algoritmu:

1. Vytvoření náhodné počáteční populace.
2. Vytvoření posloupnosti nových populací. V každém kroku je použit jedinec z aktuální generace k tvorbě další populace. Pro vytvoření populace jsou provedeny následující kroky:
 - (a) Ohodnocení každého člena aktuální populace pomocí výpočtu jeho fitness hodnoty. Vypočtené hodnoty jsou nazývány hrubé fitness skóre.
 - (b) Váhy hrubého fitness skóre jsou převedeny pomocí škálování na použitelnější rozsah hodnot. Škálované hodnoty jsou nazývány očekávané hodnoty.
 - (c) Výběr členů tzv. rodičů, na základě jejich očekávání.
 - (d) Výběr některých elitních jedinců z aktuální populace s nižším fitness skóre. Elitní jedinci jsou předáni do další populace.

- (e) Tvorba potomků (dětí) z rodičů. Děti vznikají buď náhodnými změnami jednoho rodiče (mutace) nebo kombinací vektorů dvojice rodičů (křížení).
 - (f) Nahrazení současné populace dětmi a vytvoření nové generace.
3. Zastavení algoritmu při splnění jednoho z kritérií zastavení.
 4. Provedení modifikovaných kroků pro lineární a celočíselná omezení.
 5. Upravení algoritmu pro nelineární omezení [21].

4.3 Vyhledávání parametrů modelu výměníkové stanice

Vzhledem k mnoha neznámým parametrům v modelu musel být vyřešen víceparametrový nelineární optimalizační problém. Pro vyhledávání těchto parametrů byla využita funkce *fminsearch* (popsána v kapitole 4.2.2), která je součástí balíčku Optimization Toolbox. Vstupní vektor parametrů modelu byl transformován pomocí logaritmického měřítka. Simplexový algoritmus pracuje s vektorem $X = \log\Theta$, kde Θ je vektor obsahující všechny parametry modelu. Tím je urychlena konvergence.

Kriteriální funkce směrodatná odchylka chyby (anglicky *root mean squared error* - RMSE) vstupuje do funkce *fminsearch* pro všechny vzorky naměřených signálů y_i a modelované odezvy $\hat{y}_i$, kde $i = 1, 2, 3, 4$ v krocích vzorkování k naměřených teploměry T1, T2, T3 a T4.

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{KN} \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^N [y_i(k) - \hat{y}_i(k)]^2}, \quad (4.14)$$

$$k = 1, 2, \dots, K, \quad i = 1, 2, \dots, N.$$

Funkce *fminsearch* byla využita v této práci pro vyhledávání parametrů výměníku (M_x, B_x), potrubí (M_p, B_p), radiátoru (M_r, B_r) a průtokového ohřívače vody (M_b, K_h, P).

Další z možností pro vyhledávání parametrů výměníku byla funkce *GA*, ovšem tuto funkci se bohužel nepodařilo správně nastavit.

4.4 Porovnání naměřených a nasimulovaných hodnot

Pro všechna měření byla nastavena teplota na průtokovém ohřívači vody na hodnotu 75 °C.

V grafech jsou naměřené teploty značeny modrou barvou (**Namerena**) a nasimulované barvou červenou (**Model**). Černou přerušovanou čarou je značena hodnota otevření ventilu V1, žlutou přerušovanou čarou je značena hodnota otevření ventilu V2. Hodnoty otevření ventilů jsou uvedeny v rozsahu $V \in < 0; 1 >$, tedy $\frac{V[\%]}{100}$. Zelenou přerušovanou čarou je značena informace o stavu průtokového ohřívače vody (boiler), zda je ohřev zapnutý (1), či vypnutý (0).

V přílohách v grafech A.7, A.8 a A.9 je uvedena rovnoměrnost vzorkování. Z grafů lze pozorovat, že rozdíl mezi periodami vzorkování jednotlivých vzorků je zanedbatelný, a proto není brán v potaz.

Tréninkový průběh:

Měřicí scénář tréninkového průběhu je uveden v tabulce 3.4. Tréninkový průběh slouží pro nalezení parametrů modelu a jeho naladění.

Nalezené parametry modelu výměníkové stanice pomocí funkce *fminsearch*:

Element výměníku:

$$M_x = 0,0011 \quad [l]$$

$$B_x = 9,3785 \quad [W \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$$

Radiátor:

$$M_r = 0,077 \quad [l]$$

$$B_r = 0,1237 \quad [W \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$$

Element potrubí:

$$M_p = 0,1265 \quad [l]$$

$$B_p = 0,1095 \quad [W \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$$

Průtokový ohřívač vody:

$$M_b = 1.4835 \quad [l]$$

$$K_h = 5,9008 \quad [s]$$

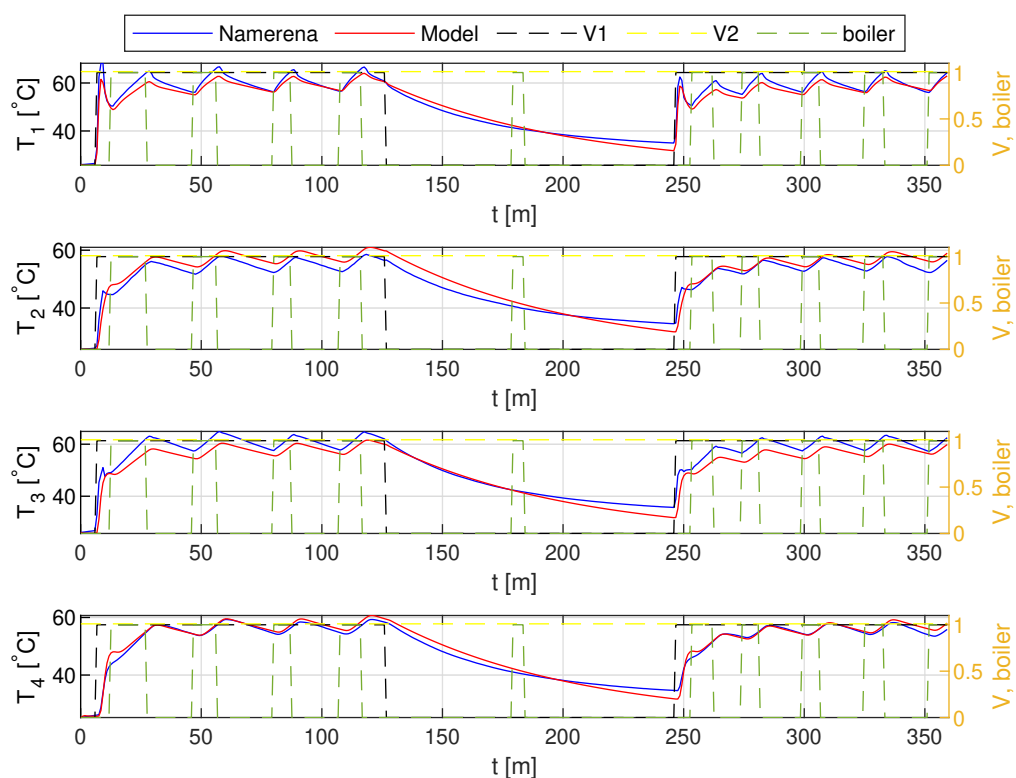
$$P = 206,2927 \quad [W]$$

(4.15)

Odchylka RMSE identifikovaného systému byla 2,43 %.

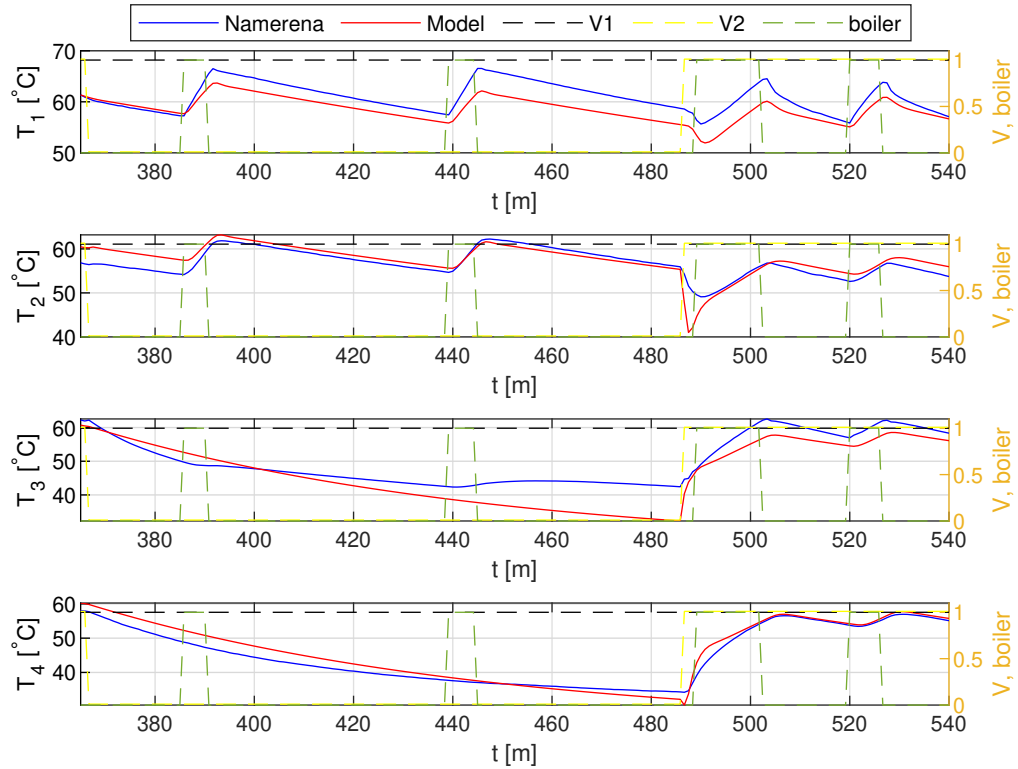
Nalezené parametry, z důvodu zanedbání některých fyzikálních jevů, neodpovídají fyzikální realizovatelnosti. Možná vylepšení pro získání fyzikálně realizovatelných parametrů jsou uvedeny v kapitole 4.5.

Část průběhu naměřených a nasimulovaných teplot tréninkového průběhu je vykreslena v grafu 4.11. Z tohoto grafu je patrné, že model téměř vystihuje naměřené hodnoty. Celý tréninkový průběh obsahující pouze průběhy naměřených a nasimulovaných teplot je uveden v přílohách v grafu A.1. Celý tréninkový průběh, včetně hodnot otevření ventilů a informace o stavu ohřívače vody, lze nalézt v přílohách v grafu A.4.



Obr. 4.11: Ukázka části tréninkového průběhu

U průběhu teploty T_3 uvedené v grafu 4.12 si lze povšimnout, že při uzavření ventilu V2 ve 4. stavu měření dochází po určité době k ohřátí vody pomocí šíření tepla trubkami (viz. kapitola 4.5). Tento jev není v modelu implementován, proto jsou průběhy naměřených a nasimulovaných hodnot v tomto úseku odlišné.



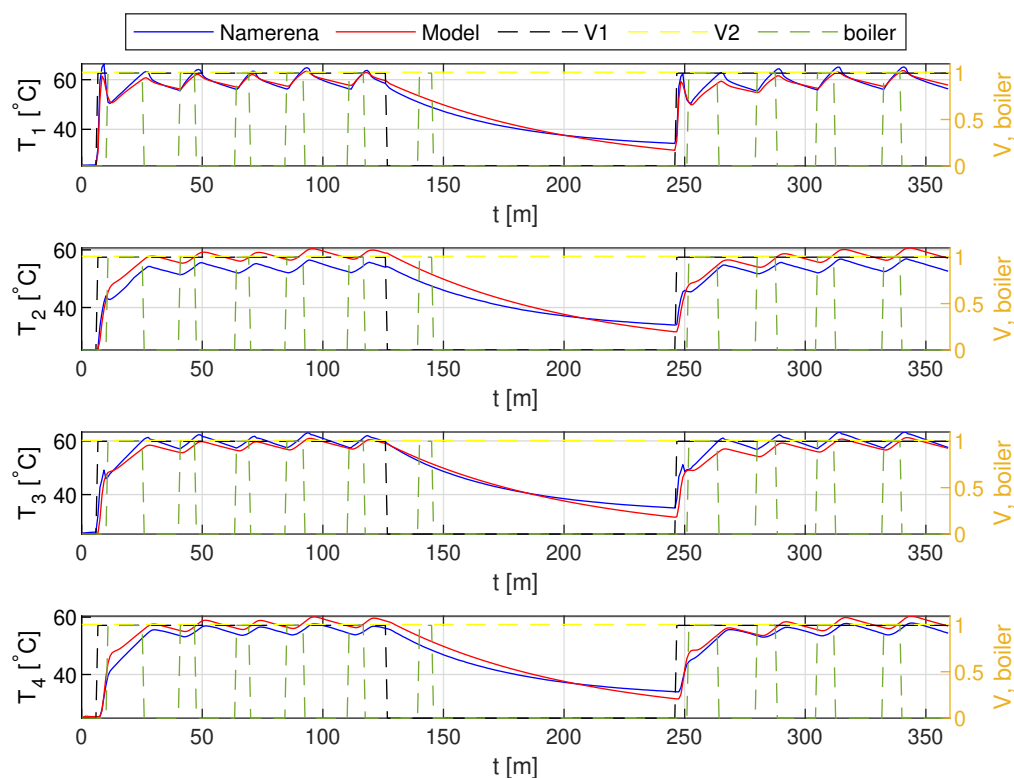
Obr. 4.12: Ukázka tréninkového průběhu při úplném uzavření ventilu V2

Validační průběh 1:

Validační průběh 1 má stejný scénář měření jako průběh tréninkový viz. tabulka 3.4. Validační průběhy slouží pro ověření, zda nalezené parametry modelu pomocí funkce *fminsearch* z tréninkového průběhu jsou validní a lze je použít pro různé měřicí scénáře.

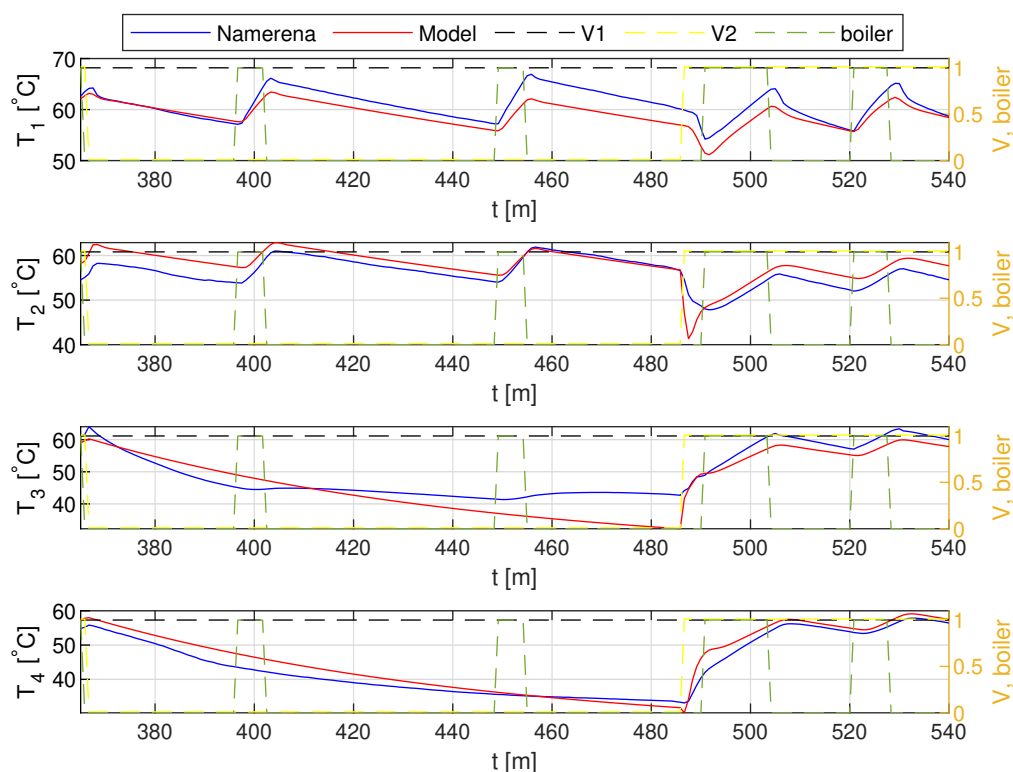
Odchylka RMSE validačního průběhu 1 byla 2,65 %. Malá odchylka validačního průběhu 1 oproti tréninkovému průběhu je způsobena proměnnou teplotou v místnosti, která není měřena, ale je předpokládána jako konstantní hodnota udržovaná za pomoci klimatizačního systému v místnosti.

Část průběhu naměřených a nasimulovaných teplot validačního průběhu 1 je vyobrazena v grafu 4.13. Celý validační průběh 1 obsahující pouze průběhy naměřených a nasimulovaných teplot je zahrnut v přílohách v grafu A.2. Celý validační průběh 1, včetně hodnot otevření ventilů a informace o stavu ohřívače vody, je uveden v přílohách v grafu A.4.



Obr. 4.13: Ukázka části validačního průběhu 1

V grafu 4.14 je možné pozorovat stejný jev ohřátí vody z trubek při uzavření ventilu V2 ve 4. stavu měření u průběhu teploty T_3 , jako je tomu v tréninkovém průběhu v grafu 4.12.



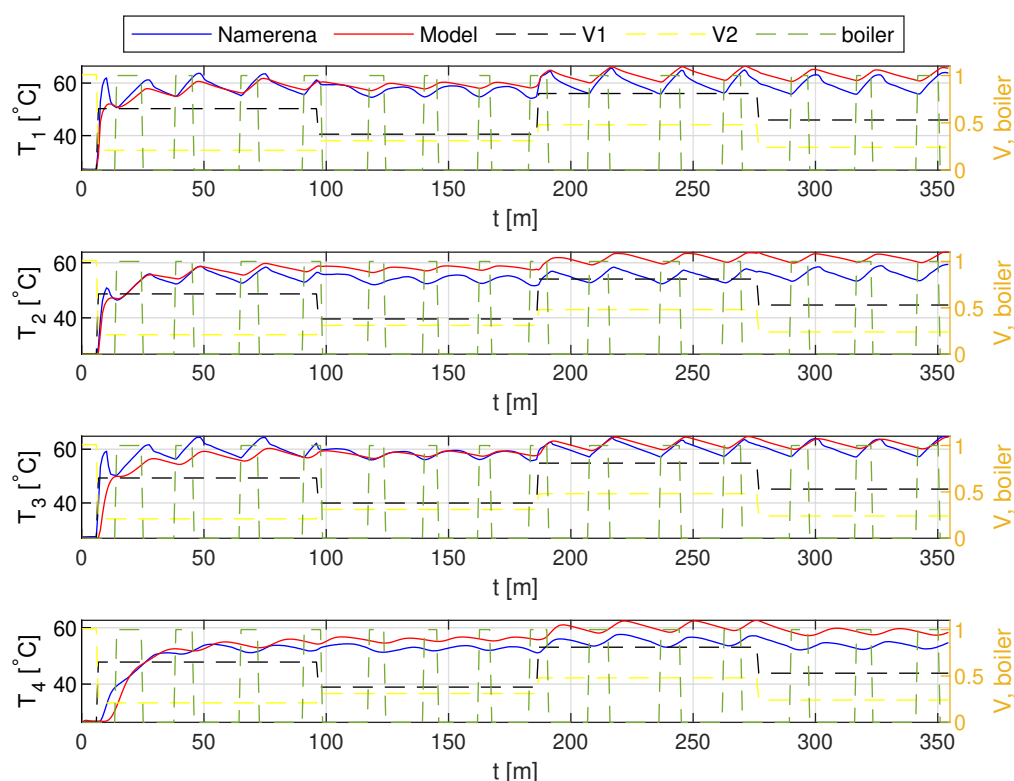
Obr. 4.14: Ukázka validačního průběhu 1 při úplném uzavření ventilu V2

Validační průběh 2:

Měřicí scénář validačního průběhu 2 je uveden v tabulce 3.5. Odchylka RMSE validačního průběhu 2 byla 4,49 %.

Část průběhu naměřených a nasimulovaných teplot validačního průběhu 2 se nachází v grafu 4.15. Je zde vidět odchylka mezi naměřenými a nasimulovanými teplotami. To je způsobeno tím, že není přímo měřena teplota v místnosti, ale je předpokládána konstantní teplota udržovaná pomocí klimatizačního systému. Dalším důvodem odchylky je nastavený linearizovaný průtok v simulačním modelu, důvod tohoto řešení je více popsán v kapitole 4.5.

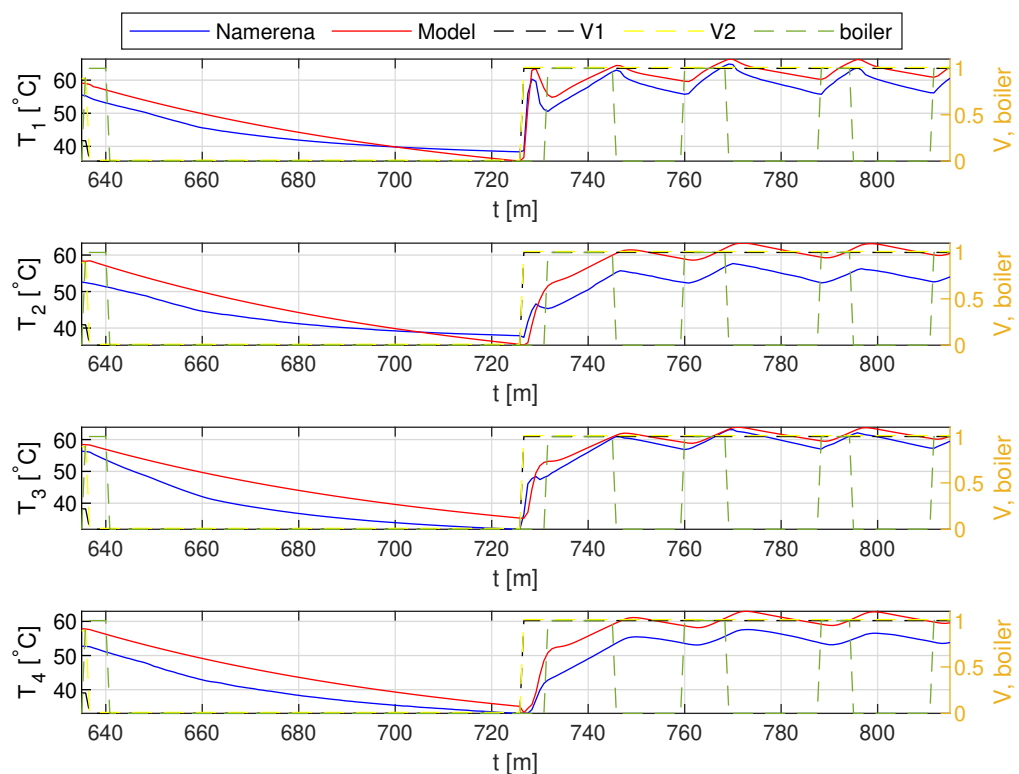
Celý validační průběh 2 obsahující pouze průběhy naměřených a nasimulovaných teplot lze nalézt v přílohách v grafu A.3. Celý validační průběh 2, včetně hodnot otevření ventilů a informace o stavu ohříváče vody, je uveden v přílohách v grafu A.6.



Obr. 4.15: Ukázka části validačního průběhu 2

V grafu 4.16 je vyobrazena část validačního průběhu 2, ve které dochází k úplnému uzavření a následnému úplnému otevření obou ventilů (V1 a V2). Z grafu si lze povšimnout, že při úplném uzavření obou ventilů nedochází k přenosu tepla mezi primárním a sekundárním okruhem. Tedy nedochází ani k ohřevu vody z trubek na výstupu výměníku v sekundárním okruhu, jako je tomu v předešlých případech, ve kterých byl uzavřen pouze ventil V2.

V grafu je také vidět, že při uzavření ventilu V1 nedochází k ohřevu vody pomocí ohřívače vody (ohřívač vody je vypnutý). V ohřívači vody zůstává ohřátá voda z předešlého ohřátí, které je možné pozorovat na začátku části průběhu v grafu 4.16. To je dáno tím, že voda proudí pouze horní částí primárního okruhu okruhu (průtok Q_{13} uvedený na obrázků 2.2), nikoli přes ohřívač vody.



Obr. 4.16: Ukázka validačního průběhu 2 při úplném uzavření ventilů V1 a V2

Popis průběhů teplot zobrazených v grafech 4.11, 4.12, 4.13, 4.14, 4.15 a 4.16:

- T_1 – naměřená a nasimulovaná teplota na vstupu výměníku v primárním okruhu
- T_2 – naměřená a nasimulovaná teplota na výstupu výměníku v primárním okruhu
- T_3 – naměřená a nasimulovaná teplota na výstupu výměníku v sekundárním okruhu
- T_4 – naměřená a nasimulovaná teplota na vstupu výměníku v sekundárním okruhu

4.5 Možnosti budoucích vylepšení modelu

V této kapitole jsou uvedena možná budoucí rozšíření pro zpřesnění simulačního modelu.

Šíření tepla trubkami

Pomocí teploměrů T1, T2 a T4 je měřena teplota povrchu potrubí - nikoli teplota vody. Bylo by dobré v budoucnu model rozšířit o model šíření tepla ve vodě a model šíření tepla trubkami. Jelikož teplota vody je jiná, než teplota trubky, čímž v modelu vzniká chyba.

Proudí-li voda pouze v primárním okruhu a v sekundárním okruhu voda stojí, měla by se teplota v sekundárním okruhu ustálit, ovšem ve skutečnosti tomu tak není, jelikož při přenosu tepla pomocí výměníku dochází k ohřívání trubek v sekundárním okruhu. Což způsobí, že se trubkami postupně začne šířit teplo a voda v sekundárním okruhu se pomalu začne ohřívát z trubek. Tento jev způsobuje další chybu modelu.

Tyto dvě rozšíření by bylo vhodné zakomponovat, jelikož způsobují největší chybu modelu.

Rychlost proudění

Momentálně je používán pouze lineární model průtoku. Jedním možným zlepšením přesnosti modelu by mohla být nelineární statická charakteristika průtoku. Dalším možným zpřesněním by mohlo být přesnější měření průtoku.

Rozšíření modelu výměníku

Další možné vylepšení je namodelovat přechody mezi komorami v deskovém výměníku tepla. Momentálně je výměník namodelován pouze jako jedna komora.

Model by bylo možné sestavit již z hotového modelu deskového výměníku tepla namodelovaného pomocí MKD, který by byl použit tolikrát, kolik má deskový výměník komor a následně by byl vypočítán přestup tepla mezi jednotlivými komorami.

Měření okolní teploty

Další možností zlepšení kvality modelu by mohlo být měření okolní teploty. Momentálně je teplota okolí brána jako konstantní hodnota 24 °C. Konstantní hodnota je udržována pomocí klimatizačního systému v místnosti. Ovšem tímto způsobem nelze získat konstantní teplotu bez výkyvů.

Závěr

Úkolem této bakalářské práce bylo získat data z reálného modelu výměníku dle navrženého měřicího scénáře a vytvořit matematický a simulační model, který co nejpřesněji interpretuje reálný model. Ovšem nejprve bylo nutné se seznámit s modelem výměníkové stanice, následně zjistit, z jakých komponent se skládá, a jak se taková stanice chová. To je detailně popsáno v kapitole 2.

Poté bylo nutné realizovat propojení reálného modelu a řídicího programu určeného pro ovládání a sběr dat z reálného modelu a vytvořit měřicí scénář chodu systému pro účely identifikace. To je uvedeno v kapitole 3.

Nakonec byl vytvořen matematický model a realizován simulační model ve vývojovém prostředí MATLAB a MATLAB Simulink. Dále bylo zhotoveno vyhledávání parametrů modelu, to vše je zahrnuto v kapitole 4. Výsledky této práce jsou shrnuty v kapitole 4.4.

Pro nalezení parametrů modelu byl použit tréninkový průběh, jehož část je vykreslena v grafu 4.11 a celý průběh se nachází v přílohách v grafech A.1 a A.4. Nalezené parametry modelu jsou uvedeny v rovnici 4.15. Odchylka RMSE byla pro tento průběh 2,43 %. Z grafů je patrné, že nasimulované teploty téměř odpovídají teplotám naměřeným. Možná rozšíření modelu, pro dosažení přesnějších výsledků, jsou sepsána v kapitole 4.5.

Pro ověření nalezených parametrů modelu byly použity dva validační průběhy. Tyto validační průběhy slouží pro ověření nalezených parametrů modelu z tréninkového průběhu. Dále slouží k ověření použitelnosti nalezených parametrů pro další různé měřicí scénáře.

Validační průběh 1, jehož část je vyobrazena v grafu 4.13 a celý průběh je zobrazen v přílohách v grafech A.2 a A.5, má stejný měřicí scénář, jako průběh tréninkový. Tento měřicí scénář je uveden v tabulce 3.4. Odchylka RMSE validačního průběhu 1 byla 2,65 %. Malá odchylka validačního průběhu 1 od tréninkového průběhu byla způsobena tím, že nebyla měřena teplota v místnosti, ale byla předpokládána jako konstantní hodnota 24 °C udržovaná klimatizačním systémem v místnosti.

Měřicí scénář validačního průběhu 2 je sepsán v tabulce 3.5. Část validačního průběhu 2 je uvedena v grafu 4.15 a celý průběh lze nalézt v přílohách v grafech A.3 a A.6. Odchylka RMSE validačního průběhu 2 byla 4,49 %. Odchylka mezi naměřenými a nasimulovanými teplotami je způsobena nastaveným linearizovaným průtokem v simulačním modelu, a také předpokládanou konstantní teplotou v místnosti.

Literatura

- [1] ODPOROVÉ TEPLoměRY PŘÍLOŽNÉ A INTERIÉROVÉ. Online. Rawet. Dostupné z: https://www.rawet.cz/data/files/products/12-01-2017_14-20_pt05-pt20.pdf. [cit. 2023-11-18].
- [2] -DS. Co je digitální dvojče a proč je užitečné. Online. Computerworld. 2019. Dostupné z: <https://www.computerworld.cz/clanky/co-je-digitalni-dvojce-a-proc-je-uzitecne/>. [cit. 2023-11-25].
- [3] MICHALEC, Libor. Digitální dvojče, co vlastně je ? Online. Automatizace.HW.cz. 2022. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/digitalni-dvojce-jak-to-vlastne-funguje.html>. [cit. 2023-11-25].
- [4] KOPEČEK, Pavel. Digitalni dvojče. Online, Diplomová práce, vedoucí Kamil Řehák. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2023. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/212330/final-thesis.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. [cit. 2023-11-29].
- [5] VAN DER AALST, Wil M. P.; HINZ, Oliver a WEINHARDT, Christof. Resilient Digital Twins. Online. Business & Information Systems Engineering. 2021, roč. 63, č. 6, s. 615-619. ISSN 2363-7005. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s12599-021-00721-z>. [cit. 2023-11-29].
- [6] BALÁŠEK, Marek. Kotle a výměníky tepla. Čtvrté. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2022. ISBN 978-80-214-6093-5.
- [7] MAJOR, Martin. Model teplovodní výměňkové stanice. Online, Bakalářská práce, vedoucí Tomáš Sýkora. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky, 2023. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=254883. [cit. 2023-12-05].
- [8] HUSÁK, Michal. Návrh a realizace laboratorní úlohy na téma "Standard ISA-S88". Online, Bakalářská práce, vedoucí Václav Kaczmarczyk. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=171766. [cit. 2023-12-05].

- [9] ČERNÍK, Michal. Modelování teplovodní výměníkové stanice a její regulace. Online, Bakalářská práce, vedoucí Ondrej Mihálik. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2022. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=246381. [cit. 2023-12-08].
- [10] THE MATHWORKS, INC. Fminsearch. Online. MATLAB fminsearch. C1994-2023. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/fminsearch.html>. [cit. 2023-12-14].
- [11] THE MATHWORKS, INC. Optimizing Nonlinear Functions. Online. MATLAB. C1994-2023. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/matlab/math/optimizing-nonlinear-functions.html>. [cit. 2023-12-14].
- [12] THE MATHWORKS, INC. Fminunc. Online. MATLAB fminunc. C1994-2023. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/optim/ug/fminunc.html>. [cit. 2023-12-14].
- [13] THE MATHWORKS, INC. System Identification Overview. Online. MATLAB. C1994-2023. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/ident/gs/about-system-identification.html>. [cit. 2023-12-14].
- [14] ALFA LAVAL. Jak funguje výměník tepla? Online. Alfa Laval. C2015-2023. Dostupné z: <https://www.alfalaval.cz/info/czech/teorie-prenosu-tepla/>. [cit. 2023-12-17].
- [15] LIENHARD IV, John H. a LIENHARD V, John H. A Heat Transfer Textbook. Online. 5th ed. Ambridge (Massachusetts): Phlogiston Press, 2020. Dostupné z: <https://ahtt.mit.edu/wp-content/uploads/2020/08/AHTTv510.pdf>. [cit. 2024-01-24].
- [16] RECKTENWALD, Gerald. Finite-Difference Approximations to the Heat Equation. Online. Mechanical Engineering. 21.1. 2004n. l., roč. 2004, č. 10, s. 2. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/265202152_Finite-Difference_Approximations_to_the_Heat_Equation. [cit. 2024-03-17].
- [17] Diferenciální rovnice a konečné difference. Online. <https://robert-marik.github.io/>. [2023]. Dostupné z: https://user.mendelu.cz/marik/wiki/am/slidy/konecne_difference.pdf. [cit. 2024-03-17].
- [18] YANG, Ping a kol. Flow distribution and heat transfer performance of two-phase flow in parallel flow heat exchange system. Online. Energy. 1.5. 2023n. l.,

- roč. 2023, č. 270. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.126957>. [cit. 2024-03-17].
- [19] THE MATHWORKS, INC. Ga. Online. MATLAB ga. C1994-2024. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/gads/ga.html> [cit. 2024-03-28].
- [20] THE MATHWORKS, INC. Nonlinear Constraint Solver Algorithms for Genetic Algorithm. Online. MATLAB. C1994-2024. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/gads/description-of-the-nonlinear-constraint-solver.html>. [cit. 2024-03-28].
- [21] THE MATHWORKS, INC. How the Genetic Algorithm Works. Online. MATLAB. C1994-2024. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/gads/how-the-genetic-algorithm-works.html>. [cit. 2024-03-28].
- [22] DOSTÁL, Zdeněk a BEREMLIJSKI, Petr. METODY OPTIMALIZACE. Online, Skripta. Ostrava: Technická univerzita Ostrava, Katedra aplikované matematiky, 2023. Dostupné z: https://home1.vsb.cz/~ber95/PhD%20Akademie/metody_optimalizace.pdf. [cit. 2024-04-03].
- [23] ZAPLETAL, Marek. Implementace a testování vybraných optimalizačních metod pro úlohy odhadu parametrů simulačních modelů. Online, Diplomová práce, vedoucí Robert Grepl. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. Dostupné z: <https://dspace.vut.cz/server/api/core/bitstreams/b6afdbb3-ea92-4595-bbec-6826a3151189/content>. [cit. 2024-04-03].
- [24] DOHNALOVÁ, Barbora. Numerické metody jednorozměrné minimalizace. Online, Bakalářská práce, vedoucí Horymír Netuka. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta, 2013. Dostupné z: <https://theses.cz/id/qz3hii/00176333-481064634.pdf>. [cit. 2024-04-03].
- [25] KOČICA, Martin. ITERAČNÍ METODY OPTIMALIZACE. Online, Diplomová práce, vedoucí Romanu Prokopovi. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky, 2006. Dostupné z: https://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/921/ko%C4%8Dica_2006_dp.pdf?sequence=1. [cit. 2024-04-03].
- [26] VLČEK, Ondřej. OPTIMALIZACE (ÚLOHY NA EXTRÉMY). Online, Bakalářská práce, vedoucí Jitka Laitochová. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, Pedagogická fakulta, Katedra matematiky, 2014. Dostupné

z: https://theses.cz/id/09ey5t/VLCEK_Ondrej_OPTIMALIZACE_ULOHY_NA_EXTREMY_Bakalarska_pra.pdf. [cit. 2024-04-03].

Seznam příloh

A Grafy	62
A.1 Průběhy naměřených a nasimulovaných hodnot	62
A.2 Perioda vzorkování	69
B Schéma zapojení	72
C Obsah přiloženého USB flash disku	78
C.1 MATLAB program a Simulink model	78
C.2 Program pro ovládání a sběr dat v TIA Portal	78

A Grafy

A.1 Průběhy naměřených a nasimulovaných hodnot

V grafech A.1, A.2 a A.3 jsou uvedeny pouze průběhy naměřených a nasimulovaných teplot.

Grafy A.4, A.5 a A.6 obsahují kromě průběhů naměřených a nasimulovaných teplot, také hodnoty otevření ventilů (V1 a V2) a informaci o stavu ohřívače vody. Hodnoty otevření ventilů jsou uvedeny v rozsahu $V \in <0; 1>$, tedy $\frac{V[\%]}{100}$.

V grafech A.7, A.8 a A.9 je uvedena rovnoměrnost vzorkování.

Barevné značení průběhů v grafech:

Naměřené teploty – modrá barva.

Nasimulované teploty – červená barva.

Hodnota otevření ventilu V1 – černá přerušovaná čára.

Hodnota otevření ventilu V2 – žlutá přerušovaná čára.

Stav průtokového ohřívače vody (boiler) – zelená přerušovaná čára.

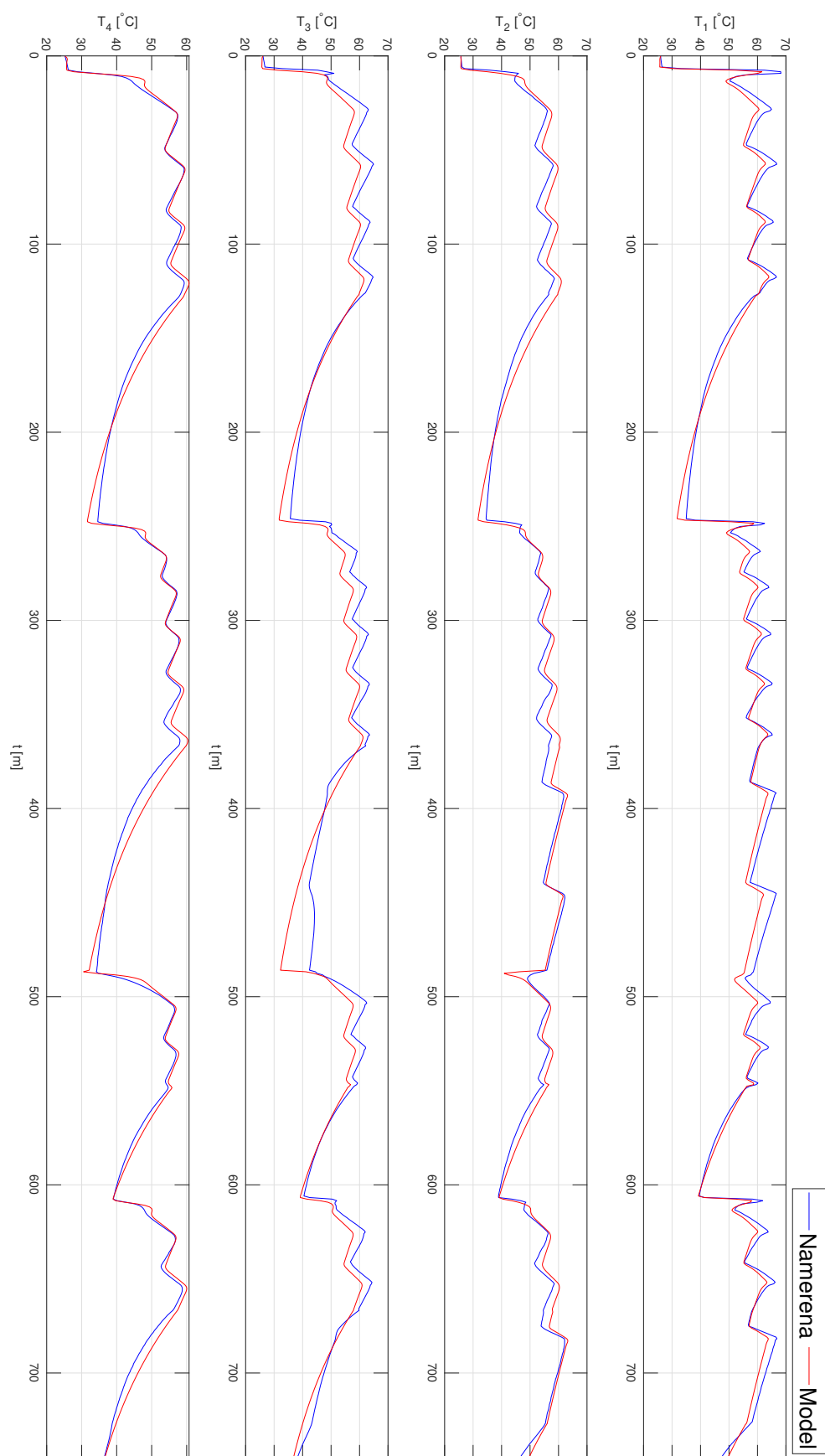
Popis průběhů teplot zobrazených v grafech:

T_1 – naměřená a nasimulovaná teplota na vstupu výměníku v primárním okruhu.

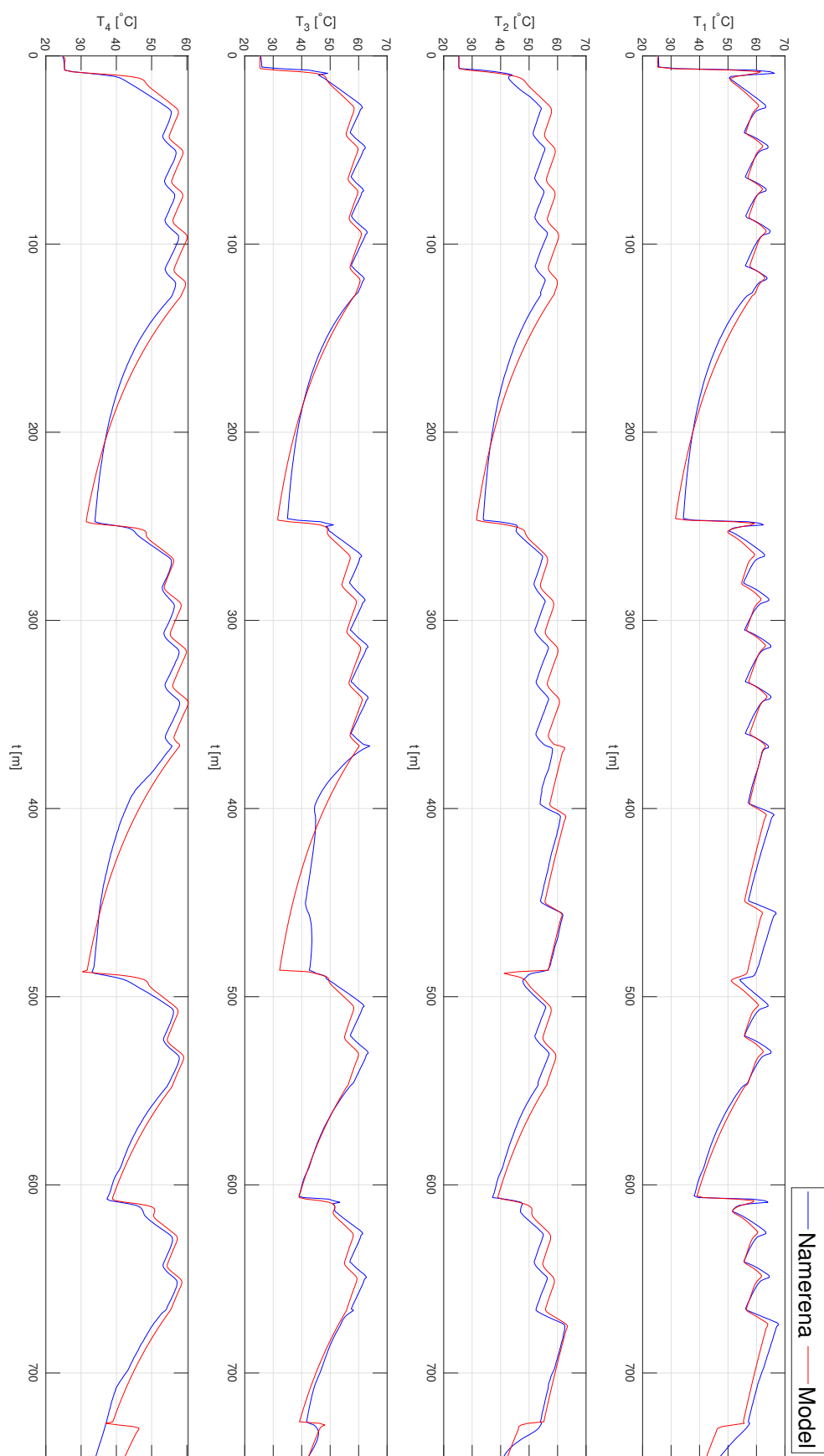
T_2 – naměřená a nasimulovaná teplota na výstupu výměníku v primárním okruhu.

T_3 – naměřená a nasimulovaná teplota na výstupu výměníku v sekundárním okruhu.

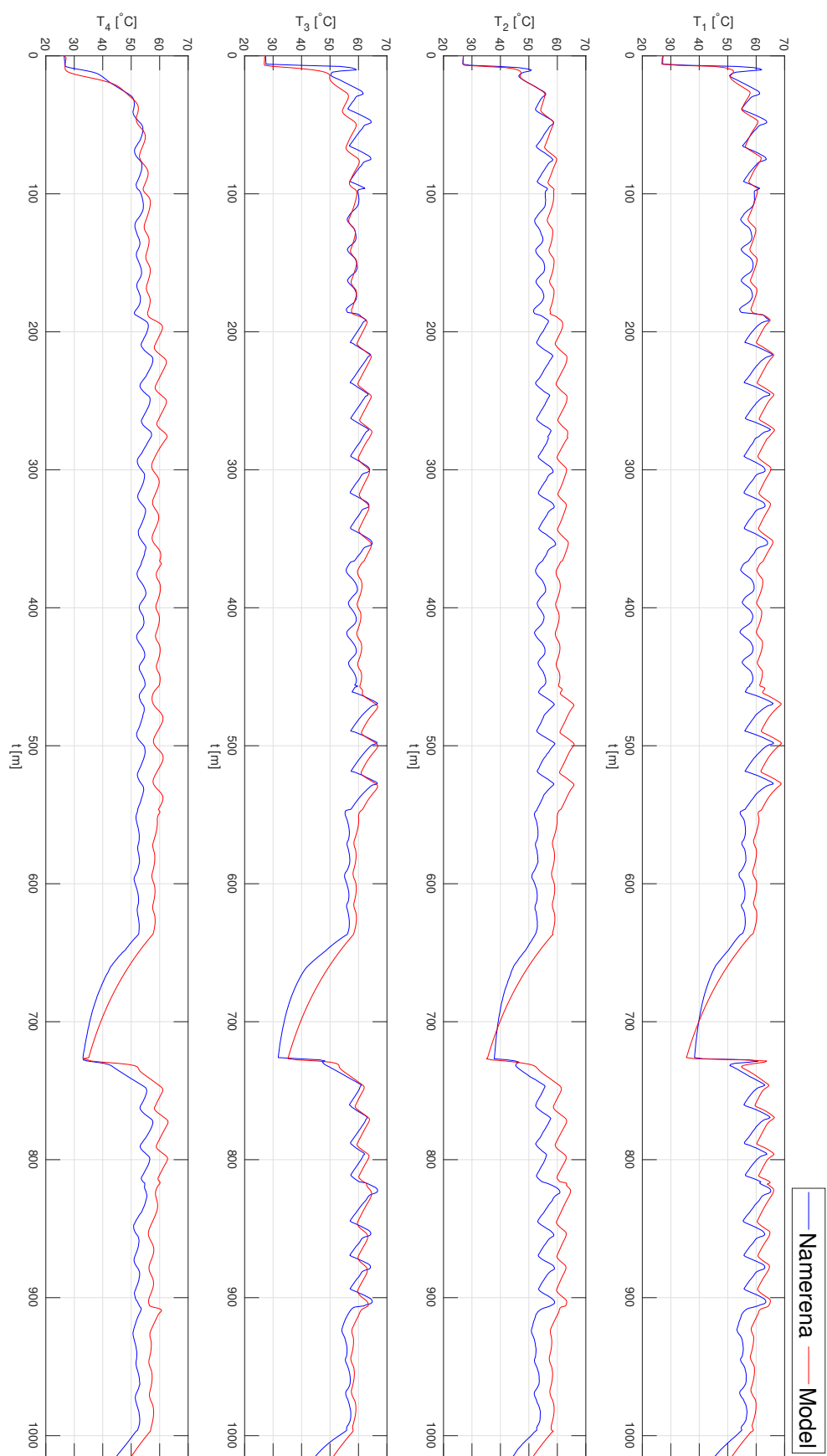
T_4 – naměřená a nasimulovaná teplota na vstupu výměníku v sekundárním okruhu.



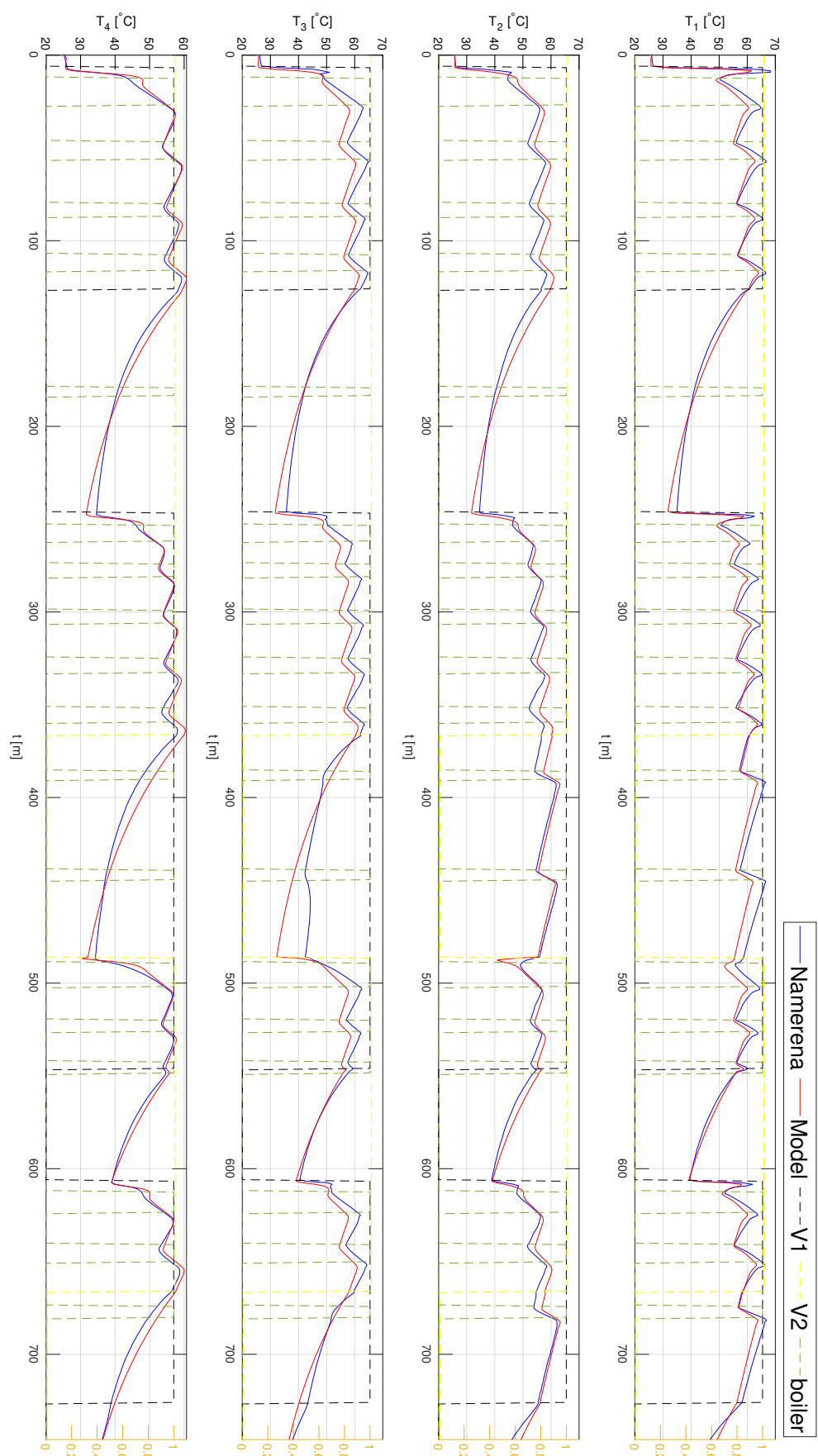
Obr. A.1: Tréninkový průběh - naměřené a nasimulované teploty



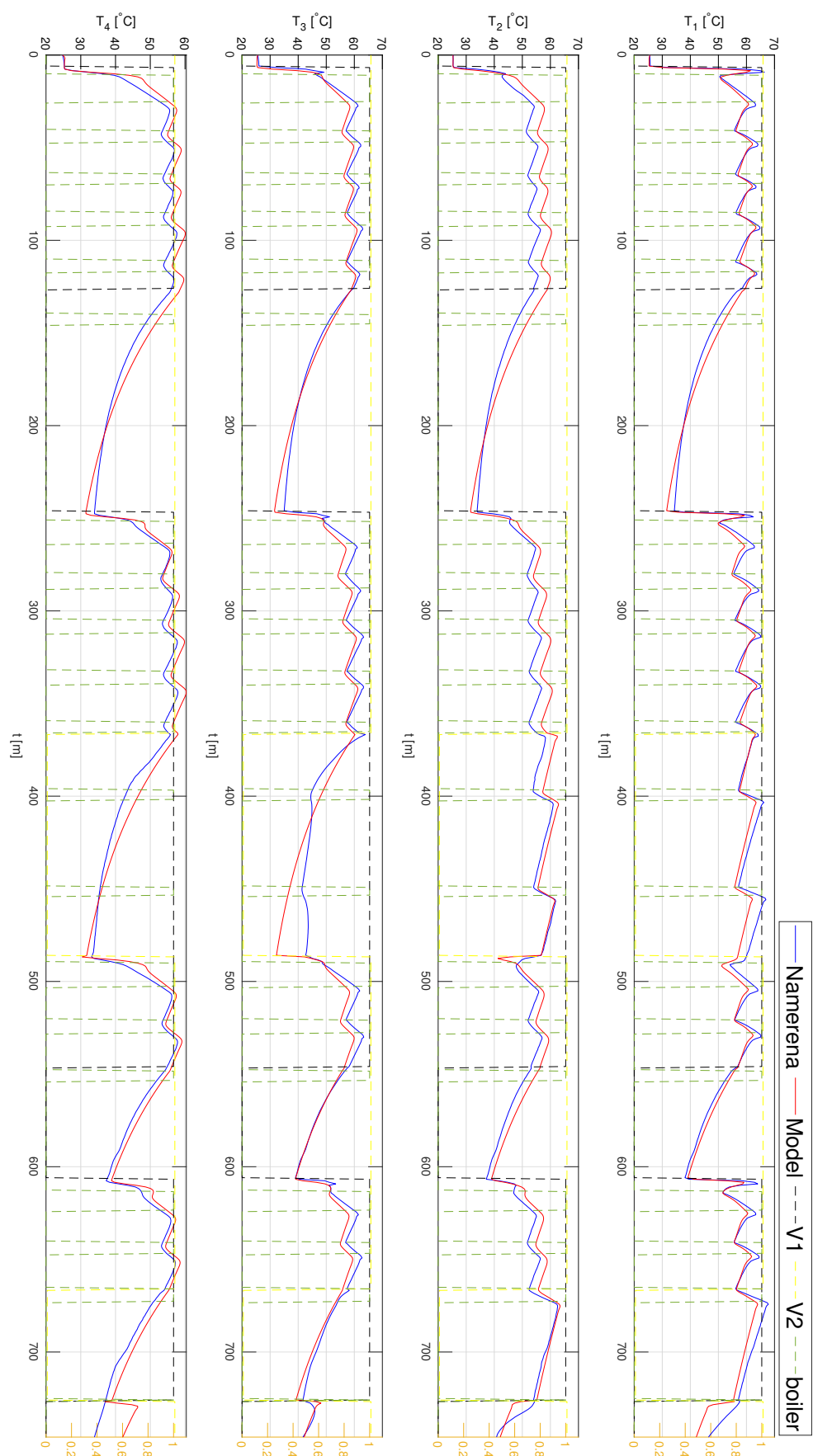
Obr. A.2: Validační průběh 1 - naměřené a nasimulované teploty



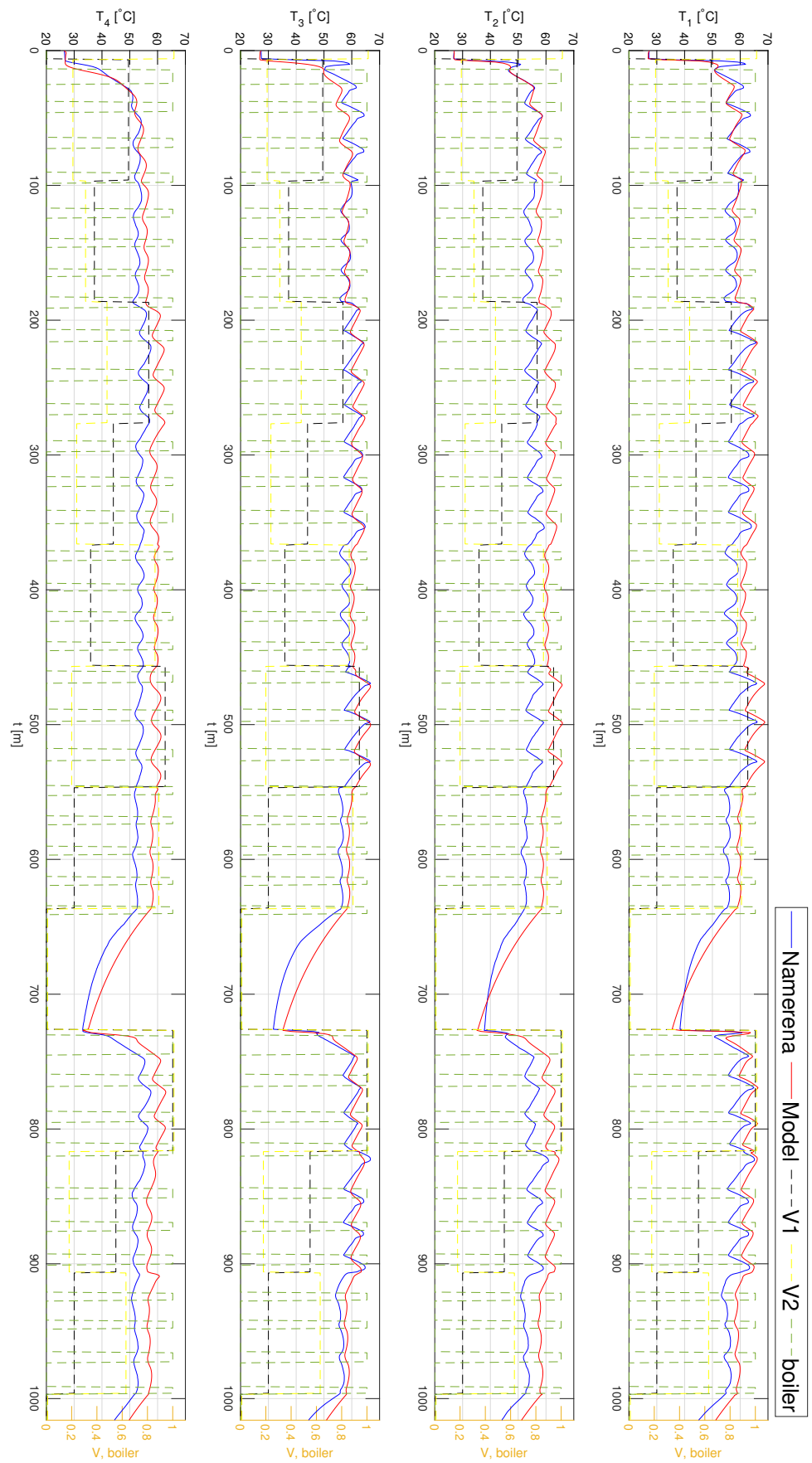
Obr. A.3: Validační průběh 2 - naměřené a nasimulované teploty



Obr. A.4: Tréninkový průběh

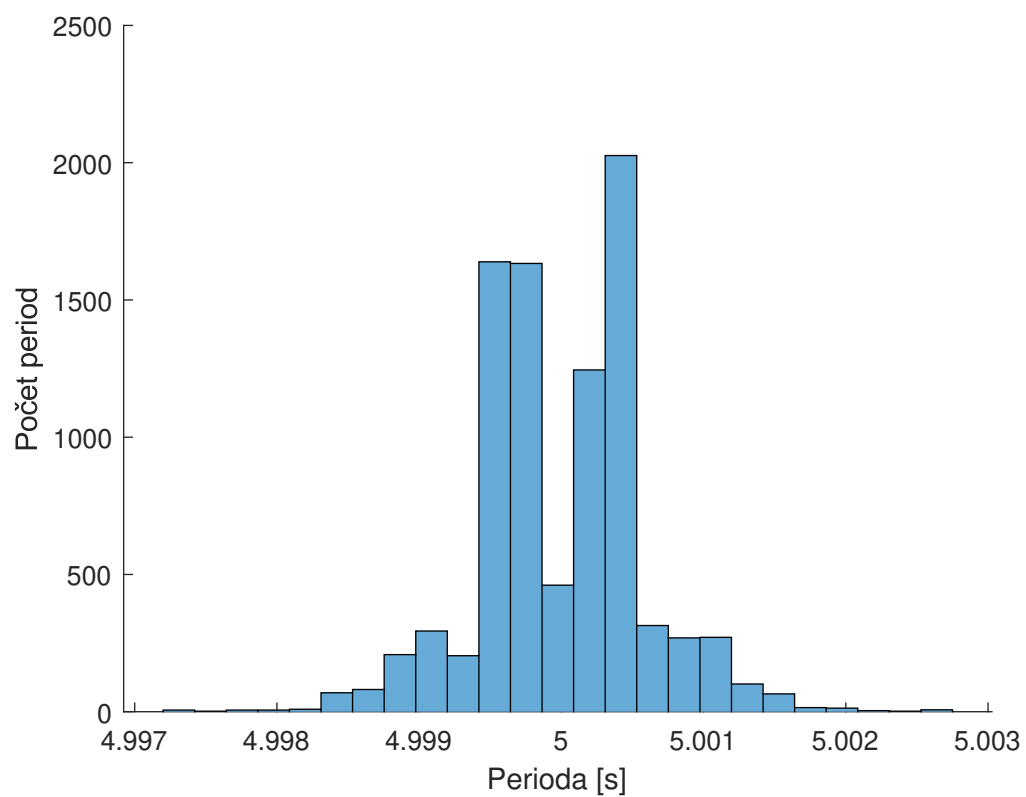


Obr. A.5: Validační průběh 1

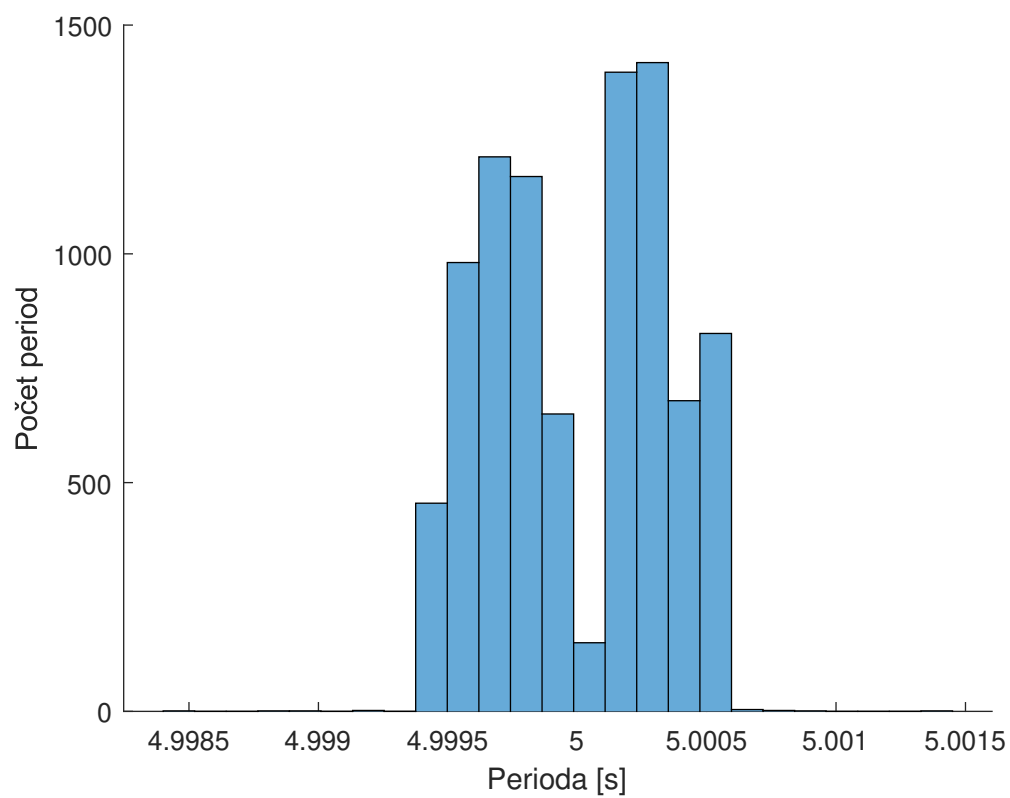


Obr. A.6: Validační průběh 2

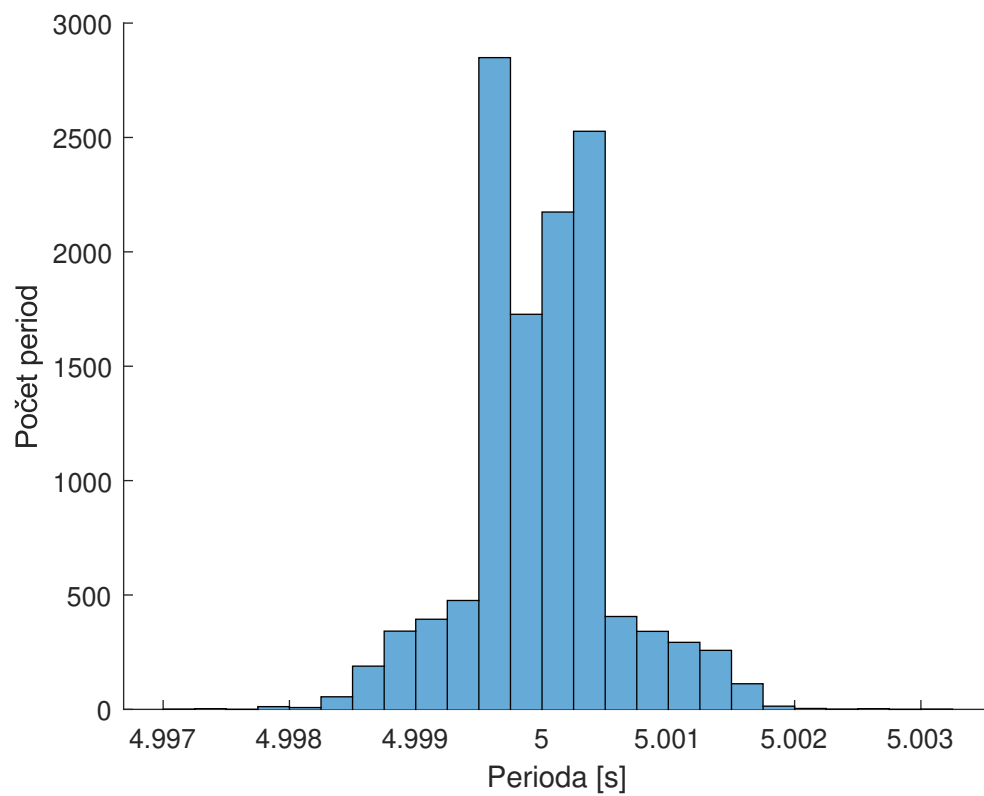
A.2 Perioda vzorkování



Obr. A.7: Perioda vzorkování - tréninkový průběh



Obr. A.8: Perioda vzorkování - validační průběh 1

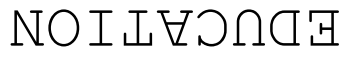


Obr. A.9: Perioda vzorkování - validační průběh 2

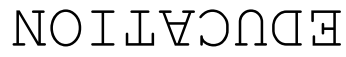
B Schéma zapojení

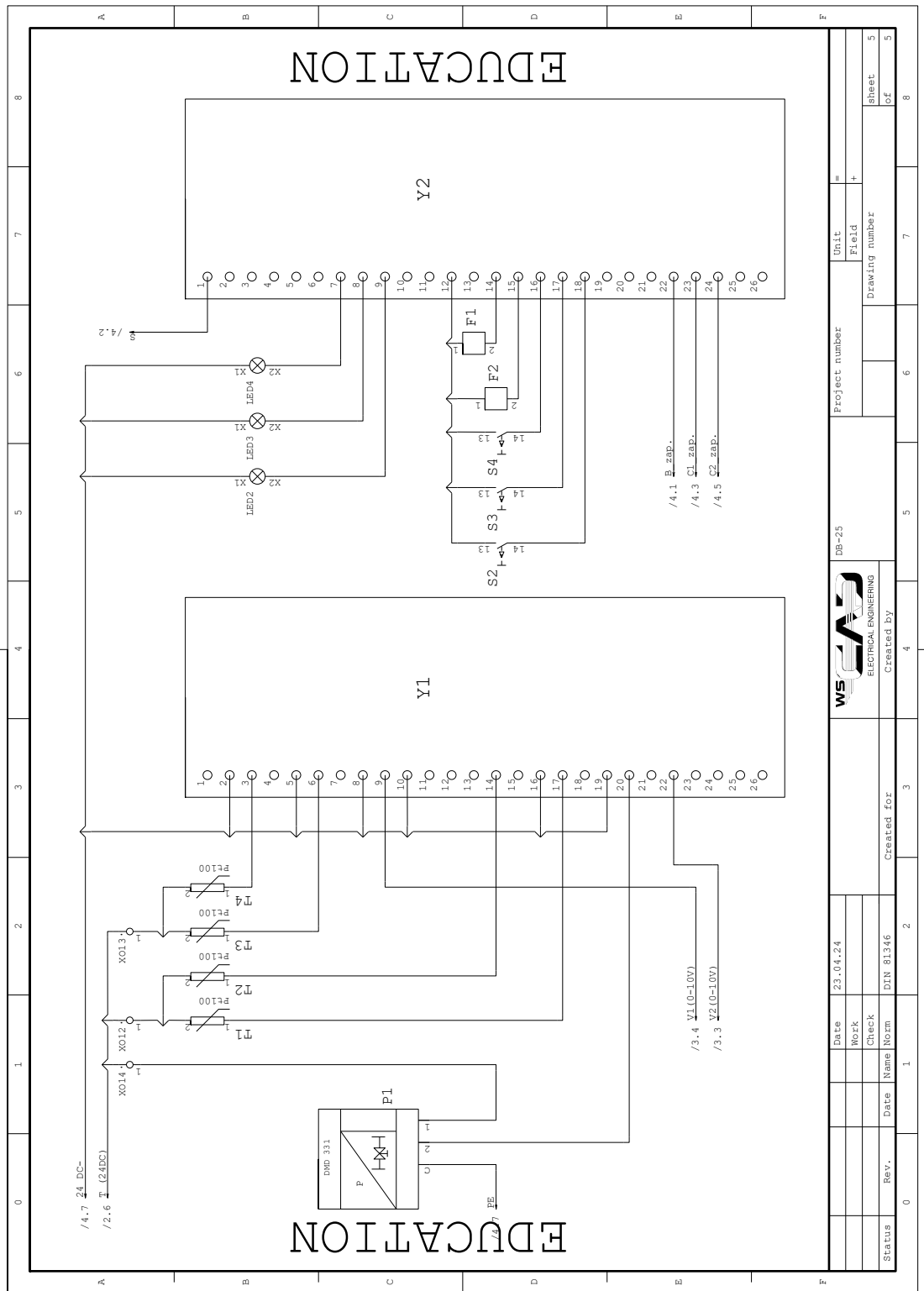
Schéma je převzato z bakalářské práce [6] a upraveno pro potřeby této práce.

74



76





Obr. B.5: Schéma zapojení - List 5

C Obsah přiloženého USB flash disku

Na přiloženém USB flash disku se nacházejí veškeré vytvořené programy, které byly využity při realizaci práce, elektronická verze práce a upravené schéma zapojení.

C.1 MATLAB program a Simulink model

Tato příloha obsahuje MATLAB skript pro identifikaci parametrů modelu, MATLAB skript pro vykreslení grafů a simulační model v MATLAB Simulink. Vše bylo realizováno ve verzi MATLAB 2023a.

C.2 Program pro ovládání a sběr dat v TIA Portal

Program, který slouží pro sběr dat a ovládání modelu výměňkové stanice, byl realizován v prostředí TIA Portal ve verzi V17.