



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

## ŘÍZENÍ VYPALOVACÍ PECE

CURE OVEN CONTROL

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Viskot

### VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Tomáš Marada, Ph.D.

BRNO 2019



## Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automatizace a informatiky  
Student: **Jan Viskot**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Aplikovaná informatika a řízení  
Vedoucí práce: **Ing. Tomáš Marada, Ph.D.**  
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### ŘÍZENÍ VYPALOVACÍ PECE

#### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Cílem bakalářské práce je návrh a realizace řízení vypalovací pece na práškové barvy programovatelným automatem. Vypalovací pec je vytápěna plynovým hořákem na zemní plyn. Nastavení parametrů a zobrazování hodnot provedte na HMI panelu.

#### **Cíle bakalářské práce:**

Výběr vhodných komponentů k řízení pece (PLC, HMI panel, plynový hořák, teploměry).  
Návrh kompletního schématu elektrického zapojení pece.  
Naprogramování PLC a HMI panelu, včetně záznamu průběhu teplot v čase vypalovacích cyklů.

#### **Seznam doporučené literatury:**

ŠMEJKAL, Ladislav a MARTINÁSKOVÁ, Marie. PLC a automatizace 1. Praha: BEN - technická literatura, 1999. ISBN 8086056589.  
ŠMEJKAL, Ladislav. PLC a automatizace 2. Praha: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 8073000873.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Radomil Matoušek, Ph.D.  
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem a realizací řízení plynové vypalovací pece na práškové barvy pomocí programovatelného automatu (PLC). V první části práce jsou definovány funkce pece a tím i požadavky na řízení. Druhá část popisuje výběr komponent v souladu s požadavky z části první. Třetí část se zabývá tvorbou výkresové dokumentace zapojení komponent, naprogramováním programovatelného automatu a HMI panelu. Poslední část práce se věnuje testování funkcí a ladění PID regulace teploty uvnitř pece.

## **ABSTRACT**

This bachelor thesis deals with the design and setting up of the control of the gas curing oven using a PLC. The first part of the thesis defines the oven functions and the control requirements. The second section describes the selection of components according to the requirements of Part One. The third part deals with programming of programmable controller and HMI panel. The last part of the thesis is devoted to testing of functions and tuning of PID temperature control inside the furnace.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Vypalovací pec, řízení, regulace, programovatelný automat

## **KEYWORDS**

Cure oven, control, regulation, programmable logic computer

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

VISKOT, Jan. *Řízení vypalovací pece*, Brno, 2019. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automatizace a informatiky.





## **PODĚKOVÁNÍ**

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Tomáši Maradovi, Ph.D. za odborné rady v průběhu vypracování mé bakalářské práce a zejména bych chtěl poděkovat panu Michaelu Fíkovi za nesmírně cenné rady z oblasti vypalovacích pecí.



## **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Tomáše Marady, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu literatury.

V Brně dne 15. 5. 2019

.....

Jan Viskot

## OBSAH

<b>1</b>	<b>POPIS PECE .....</b>	<b>13</b>
1.1	Definice funkcí.....	14
1.2	Popis funkcí a podmínek.....	14
<b>2</b>	<b>VÝBĚR KOMPONENTŮ .....</b>	<b>17</b>
2.1	PLC a rozšiřující moduly .....	17
2.2	HMI panel .....	18
2.3	Zdroj.....	19
2.4	Teploměry .....	20
2.5	Výkonové spínací prvky .....	20
2.6	Hořák.....	21
2.7	Rozváděčová skříň .....	22
<b>3</b>	<b>NÁVRH PROGRAMU PLC .....</b>	<b>22</b>
3.1	Popis řídicího cyklu .....	22
3.2	Členění do podprogramů.....	22
3.3	Vývojové prostředí.....	23
3.4	Hlavní funkce programu .....	23
<b>4</b>	<b>VIZUALIZACE POMOCÍ HMI .....</b>	<b>25</b>
4.1	Vývojové prostředí.....	25
4.2	Automatický režim.....	25
4.3	Nastavení.....	26
4.4	Manuální režim .....	26
4.5	Průběh teploty .....	27
4.6	Historie vypalovacích cyklů.....	27
<b>5</b>	<b>ZAPOJENÍ A OŽIVENÍ .....</b>	<b>28</b>
<b>6</b>	<b>TESTOVÁNÍ A LADĚNÍ PID REGULÁTORU .....</b>	<b>28</b>
6.1	Nastavení parametrů PID smyčky.....	29
6.2	Identifikace soustavy pomocí funkce Autotuning .....	29
6.3	Test nastavených parametrů.....	30
6.4	Zhodnocení regulace .....	30
<b>7</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>31</b>
<b>8</b>	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>33</b>
<b>9</b>	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ.....</b>	<b>35</b>
<b>10</b>	<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>35</b>
<b>11</b>	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>37</b>

# ÚVOD

Práškové lakování je v technické praxi velmi využívaná metoda povrchové úpravy zejména kovových dílců. Tuto technologii lze rozdělit na tři části. Jsou jimi: předúprava povrchu, nanášecí stanoviště prášku a vypalovací pec. Podle použití dílce se volí materiál barvy. Každý z materiálů má mírně jiné vlastnosti a vyžaduje rozdílný vypalovací cyklus. Teploty vypalování se pohybují od 140 do 200 °C a vypalovací čas obvykle od patnácti do třiceti minut.

Na základě velikosti lakovaných dílců se navrhla komorová průjezdná pec, kterou vytápí plynový hořák a bude zavážena podvěsným dopravníkem. Cílem práce je navrhnout celé řízení pece, včetně realizace. Návrh zahrnuje výběr komponentů, nakreslení výkresů jejich zapojení, sestavení rozvaděče, programování programovatelného automatu a HMI panelu a závěrečné testování, včetně nastavení PID regulace teploty.

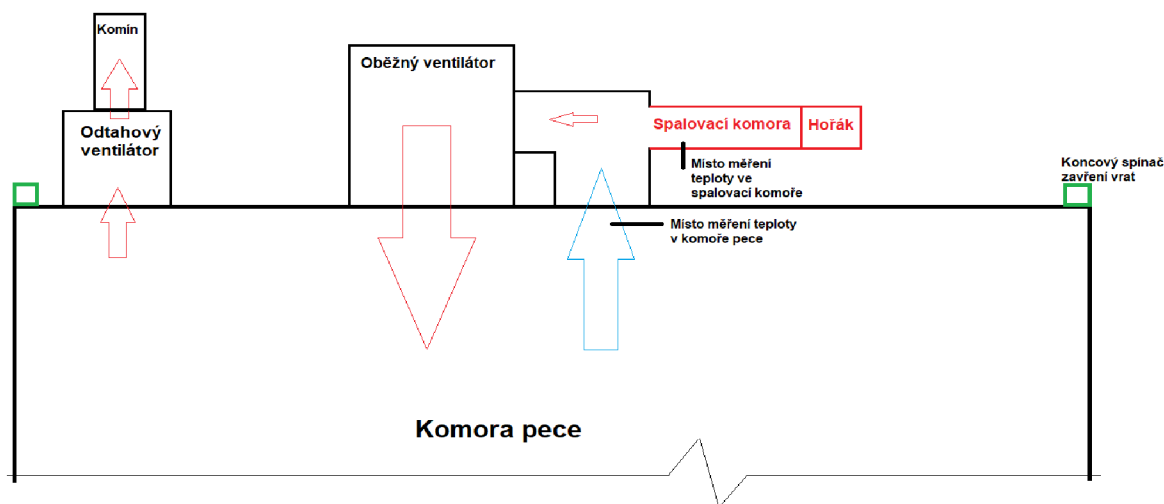
## MOTIVACE

Důvodů, proč jsem si vybral toto téma, je hned několik. V první řadě plánuji otevření vlastní práškové lakovny, kam je potřeba pořídit potřebnou technologii, takže stavbou vlastní pece jsem schopný ušetřit významné množství financí.

Za druhé mě baví stavba rozvaděčů a programování programovatelných automatů i s využitím HMI panelu. Proto je tato práce ideální šance získat v tomto oboru nové poznatky a dále se zdokonalit.

## 1 POPIS PECE

S ohledem na velikost lakovaných dílců byla navržena komorová pec o vnitřních rozměrech 4000x2000x2000mm (délka x šířka x výška). Funkční schema technologie ilustruje obrázek 1.



Obr. 1: Funkční schéma pece

Jednou z hlavních částí systému je cirkulační ventilátor. Ten slouží k nucené cirkulaci teplého vzduchu a v podstatě k transportu tepla od hořáku a spalovací komory do komory pece. Cirkulační ventilátor má průtok  $10\,000\text{ m}^3/\text{h}$  a je poháněn asynchronním elektromotorem Siemens o výkonu 4kW. Vzhledem k systému přímého ohřevu (dílce ohřívá horký vzduch s přítomností spalin), je nutný odtahový ventilátor. Ten zajišťuje funkci komínu a odvádí spaliny ven z pece. Odtahový ventilátor má průtok  $1000\text{ m}^3/\text{h}$  a pohání ho asynchronní elektromotor o výkonu 1,5kW.

Dalším důležitým prvkem je plynový hořák spalující zemní plyn. Ten má na starost vytápění celé pece. Byl vybrán plynový dvoustupňový hořák MaxGas 120 P AB od firmy Tecflam, s tepelným výkonem v rozsahu od 40 do 120kW.

Informaci o uzavření dveří zajišťují koncové spínače umístěné na obě strany pece. A nakonec nejdůležitější snímače celé pece jsou odporové snímače teploty Pt100.

## 1.1 Definice funkcí

Tab. 1: Akční členy

Funkce:	Člen:	Stavy:	Ovládací signál:
Cirkulace vzduchu	Cirkulační ventilátor	vyp/zap	binární
Odtah vzduchu	Odtahový ventilátor	vyp/zap	binární
Vytápění	Plynový Hořák	vyp/low/high	2x binární

Tab. 2: Senzory

Funkce:	Člen:	Stavy:	Výstupní signál:
Měření teploty spalovací komory	Teploměr Pt100	0-350	analog-Pt100
Měření teploty komory pece	Teploměr Pt100	0-350	analog-Pt100
(2x) Kontrola zavření dveří	Koncový snímač	otevřeno/ zavřeno	binární
(2x) Kontrola chodu ventilátoru	Stykač	vyp/zap	binární
Nouzové vypnutí	Stop tlačítko s aretací	vyp/zap	binární

## 1.2 Popis funkcí a podmínek

### Cirkulace vzduchu

Funkce cirkulace vzduchu má za úkol rozvod horkého vzduchu od hořáku do pece. Musí být v chodu v průběhu celého vypalovacího cyklu. Ovládá se binárním signálem, při logické nule je vypnutý, při logické jedničce je zapnutý. **Podmínky:** Stop tlačítko neaktivní.

### **Odtah vzduchu**

Funkce odtahu vzduchu zajišťuje funkci komínu, musí být v chodu vždy, pokud má být spuštěný hořák. Ovládá se binárním signálem, při logické nule je vypnutý, při logické jedničce je zapnutý. **Podmínky:** Stop tlačítko neaktivní.

### **Vytápění**

Funkce zajišťující zvyšování teploty v peci se ovládá pomocí dvou binárních signálů. První signál určuje vypnutí a zapnutí hořáku, druhý signál určuje buď vysoký nebo nízký výkonový stupeň. **Podmínky:** Stop tlačítko je neaktivní, cirkulační ventilátor je zapnutý, odtahový ventilátor je zapnutý, teplota ve spalovací komoře je  $\leq 350^{\circ}\text{C}$ .

### **Měření teploty spalovací komory**

Měření teploty ve spalovací komoře má ochrannou funkci, která je nutná pro případ poruchy hořáku, nebo ventilátorů a přehřátí spalovací komory a celé pece, které by mohlo vést až k požáru. Měření zajišťuje odporový teploměr typu Pt100.

### **Měření teploty komory pece**

Měření teploty ve spalovací komoře je nutné pro regulaci teploty vypalovacího cyklu, takže je to nejdůležitější informace z hlediska kvality regulace a výsledné kvality povrchové úpravy dílce. Měření zajišťuje odporový teploměr typu Pt100.

### **Kontrola zavření dveří**

Jedná se o kontrolu uzavření prostoru pece. V případě nedovření dveří by vypalovací cyklus byl buď energeticky náročnější a časově náročnější, než je nutné, nebo by dokonce nemusel stačit výkon hořáku k dosažení požadované teploty pro vypalovací cyklus. Měření zajišťuje odporový teploměr typu Pt100.

### **Kontrola chodu ventilátorů**

Kontrola ventilátorů je potřeba k ověření cirkulace a odtahu vzduchu a předchází tak přehřátí spalovací komory a celé pece v případě poruchy. Využívá se spínacích kontaktů na stykači, takže dokáže odhalit poruchu PLC výstupu a stykače.

### **Nouzové vypnutí**

Nouzové vypnutí je povinný prvek každého stroje předepsaný normou. Umožňuje obsluze v jakýkoli moment odstavit z provozu ventilátory a hořák. Používá se hříbové tlačítko s aretací a vypínají se všechny akční členy, přičemž napájení řízení zůstává zachováno.





## 2 VÝBĚR KOMPONENTŮ

Tato kapitola se zabývá výběrem vhodných komponentů k řízení pece. Vhodnost komponentů pro danou aplikaci se posuzuje zejména dle definice funkcí z předchozí kapitoly a v neposlední řadě hraje roli také cena.

### 2.1 PLC a rozšiřující moduly

Z kapitoly 1.1 vyplývá počet potřebných vstupů a výstupů řídicího PLC a jejich typu. Ke zvládnutí řízení všech funkcí je potřeba minimálně pět binárních vstupů, čtyři binární výstupy a dva vstupy analogového typu pro odporové teploměry Pt100. Dále je potřebné uvažovat rozhraní pro komunikaci s HMI panelem. V následující tabulce 3 jsou porovnány parametry PLC a v tabulce 4 potřebné moduly od třech výrobců, se kterými měl autor možnost v minulosti pracovat.

Tab. 3: Porovnání PLC

Výrobce	Delta Automation	Siemens	Phoenix Contact
Typ	DVP SE	S7-1200	ILC 131 ETH
Objednáací číslo	DVP12SE11T	6ES7214-1AF40-0XB0	ILC 131 ETH - 2700973
Napájecí napětí	24 VDC	24 VDC	24VDC
Max. počet modulů	13+7	16	63
Digitální vstupy	8	14	8
Digitální výstupy	4	10	4
Analogové vstupy	0	2	0
Hardwarové rozhraní	Ethernet, 2xRS-485	Ethernet, Profinet	Ethernet,
Komunikační protokoly	TCP/IP, Modbus, ASCII/RTU	Modbus TCP, Profibus, ASI, Modbus,Profinet IO	Modbus TCP,Profinet, Interbus,
Cena [Kč]	6 324	12 162	10 712

Tab. 4: Porovnání modulů

Výrobce	Delta Automation	Phoenix Contact
Typ	DVP04PT-S	IB IL AI 2/SF-PAC
Objednací číslo	DVP04PT-S	2861302
Napájecí napětí	24VDC	24VDC
Digitální vstupy	0	0
Digitální výstupy	0	0
Analogové vstupy	4	2
Cena [Kč]	3 493	4 464

Po porovnání parametrů byl zvolen programovatelný automat s analogovým modulem od firmy Delta Automation. Velkou váhu nakonec měla cena za automat a modul s dostatečným počtem vstupů a výstupů, včetně komunikačních rozhraní. Velmi zajímavá je zároveň filosofie firmy v oblasti softwaru, kde veškerý software potřebný pro nastavení a programování produktů Delta je poskytován zdarma a je volně stažitelný z webu zákaznického centra.

## 2.2 HMI panel

Další důležitá součást stroje je HMI panel. HMI je zkratka anglického označení Human machine interface a lze ji přeložit jako rozhraní mezi člověkem a strojem. V současnosti se obvykle používají tzv. operátorské panely ve formě dotykového displeje. Mají za úkol jak zobrazování informací pro operátora a jejich ukládání, tak zadávání hodnot a celkové ovládání stroje, kdy nahradí například množství klasických tlačítek. [1]

Následující tabulka 5 porovnává parametry tří panelů od stejných výrobců, jako programovatelné automaty.

Tab. 5: Porovnání HMI panelů

Výrobce	Delta Automation	Siemens	Phoenix Contact
Typ	DOP-B07S(E)415	Simatic HMI	BTP 2070W
Objednací číslo	DOP-B07S(E)415	KTP 700	BTP 2070W - 1046666
Napájecí napětí	24 VDC	24 VDC	24 VDC
Velikost displeje	7 palců	7 palců	7 palců
Ovládání	Dotykové	Dotykové + 5 kláves	Dotykové
Hardwarové rozhraní	Ethernet, RS-485/422/232	Ethernet,	Ethernet, RS-485/422/232
Komunikační protokoly	Modbus ASCII/RTU a většina běžně používaných protokolů pro PLC	Profibus, Profinet	Profinet
Cena [Kč]	11 271	16 378	12 670

V porovnání HMI panelů opět nabízí nejnižší cenu firma Delta a nabízí také všechny potřebné funkce pro zadanou aplikaci. Výběr zároveň dává smysl i z důvodu podobné filosofie softwaru a tím pádem rychlejší zvládnutí problematiky programátorem. Software pro design HMI panelu je opět zdarma.

### 2.3 Zdroj

Napájecí zdroj zajišťuje změnu 230V střídavého napětí ze sítě na požadovaných 24V stejnosměrného napětí, které je potřeba pro napájení PLC a HMI.

Tab. 6: Porovnání zdrojů

Výrobce	Delta Automation	Murrelektronik	Omron
Typ	DRC-24V100W1AZ	Picco 24V/100W 4,2A 1f	S8VK-G12024 120W
Výstupní napětí	24 VDC	24 VDC	24 VDC
Výstupní proud	3,8 A	4,2 A	5 A
Výkon	100 W	100 W	120 W
Vstupní napětí	100-240VAC 50-60Hz	100-240VAC 50Hz	100-240VAC 50Hz
Cena [Kč]	895	1 170	1 282

Byl vybrán zdroj od firmy Delta. Kromě ceny je výhodou také dodání více komponentů od stejného dodavatele najednou.

## 2.4 Teploměry

Prakticky nejdůležitější senzor vypalovací pece je teploměr. Na základě doporučení odborníka na pece byl vybrán odporový teploměr Pt100. Odporové teploměry Pt100 se vyznačují poměrně vysokou přesností na rozdíl od termočlánků a termistorů. Za nedostatek lze považovat pomalejší dobu reakce na změnu teploty a cena teploměru.

Tab. 7: Teploměry

<b>Výrobce</b>	<b>WIKA</b>	
<b>Typ</b>	TR10-C-M-160	
<b>Druh čidla teploty</b>	Odporový, Pt100	
<b>Rozsah měření</b>	-50 až 400 °C	
<b>Průměr a typ sondy</b>	9mm, v jímce	
<b>Tolerance</b>	Třída B	
<b>Cena [Kč]</b>	1 610	

## 2.5 Výkonové spínací prvky

K ovládní cirkulačního i odtahového ventilátoru jsou nezbytné výkonové spínací prvky. V tomto případě není potřeba regulovat otáčky motorů a není tedy potřeba frekvenční měnič. V takových případech se nejčastěji používá motorový spouštěč, který slouží jako proudová ochrana motoru a elektricky ovládaný třípólový stykač. Ovládací napětí stykače může být různé. Zde je použito stejné napětí jako pro napájení řízení, tedy 24VDC.

Následující tabulky 6 a 7 již zobrazují vybrané stykače a motorové spouštěče. Produktů tohoto typu je na trhu nepřehledné množství a jejich objektivní řešerše a výběr přesahují časové možnosti projektu. Vzhledem k jejich celkem zanedbatelné ceně v rámci hodnoty projektu proběhl jejich „zrychlený“ výběr.

Tab. 8: Stykače

<b>Výrobce</b>	<b>Schneider Electric</b>	<b>Schneider Electric</b>
<b>Typ</b>	Ministrykač 9A 1Z LP4K0910BW3	Ministrykač 6A 1Z LP4K0610BW3
<b>Ovládací napětí</b>	24 VDC	24 VDC
<b>Provozní proud</b>	9 A	6 A
<b>Provozní výkon</b>	4 kW	2,2 kW
<b>Počet pomocných kontaktů</b>	1	1
<b>Cena [Kč]</b>	439	403

Tab. 9: Motorové spouštěče

Výrobce	Schneider Electric	Schneider Electric
Typ	Spouštěč motoru GZ1E14 TVS 6-10A	Spouštěč motoru GZ1E08 TVS 2,5-4A
Typ ochrany	Termomagnetická	Termomagnetická
Provozní proud	6-10 A	2,5-4 A
Provozní výkon	4 kW	1,5 kW
Typ ovládacího prvku	Tlačítko	Tlačítko
Cena [Kč]	620	538

## 2.6 Hořák

K vytápění pece bylo rozhodnuto použít dvoustupňový hořák spalující zemní plyn. Hořáky dvou výrobců porovnává následující tabulka 8.

Tab. 10: Hořáky

Výrobce	Weishaupt	Ecoflam
Typ	WG 10N/1-D, Z-LN	Max Gas 120 P AB
Tepelný výkon	25-100 kW	40-120 kW
Regulace výkonu	Dvoustupňová	Dvoustupňová
Napájení	230VAC 50Hz	230VAC 50Hz
Ovládání	2x Binární vstup	2x Binární vstup
Cena[Kč]	53 600	49 900

Po delší úvaze byl vybrán hořák Ecoflam. Hořák Weishaupt má sice zavedenou tradici a vysokou spolehlivost. Pro hořák Ecoflam bylo nakonec rozhodnuto z důvodu blízké pobočky zastoupení a tím pádem rychlého a dostupného servisu. Cena v tomto případě hrála zanedbatelnou roli.

## 2.7 Rozváděčová skříň

Rozváděčová skříň umožňuje přehlednou montáž všech prvků řízení na jedno místo a hlavně zajišťuje jejich ochranu před vlivy okolního prostředí, zejména před prachem. Určení rozměru závisí na přístrojích umístěných uvnitř a obvykle se nechává rezerva místa pro případné doplnění dalších prvků.

Tab. 11: **Rozváděčová skříň**

<b>Výrobce</b>	<b>Schneider Electric</b>
<b>Typ</b>	Special 3D 700x500x250
<b>Rozměry [mm]</b>	700x500x250
<b>Stupeň krytí</b>	IP66
<b>Příslušenství</b>	Montážní panel
<b>Barva</b>	RAL 7035
<b>Cena [Kč]</b>	2 635

## 3 NÁVRH PROGRAMU PLC

### 3.1 Popis řídicího cyklu

Při startu cyklu se uvedou do chodu cirkulační a odtahový ventilátor. Po jejich spuštění následuje zapálení hořáku a ohřev vzduchu na zadanou teplotu. Po dosažení teploty o deset stupňů nižší, než je teplota požadovaná, se aktivuje časovač, který po odpočítání nastaveného času cyklus ukončí. V průběhu celého cyklu probíhá regulace teploty na požadovanou hodnotu, kontrola teploty spalovací komory, chodu ventilátorů a uzavření obou vrat pece. Cyklus je též popsán vývojovým diagramem, který je umístěn v příloze.

### 3.2 Členění do podprogramů

Řídicí cyklus byl z důvodu přehlednosti programování rozdělen do čtyř podprogramů. První se nazývá Inicializace a je spuštěn pouze jednou, hned po startu PLC. Slouží k nastavení konstant potřebných ke správnému chodu programu.

Druhý podprogram s názvem Errorcheck neustále kontroluje zakázané stavy. V případě jakékoliv poruchy nebo nedovoleného stavu odstaví pec z chodu.

Třetí část, Měření, ukládá naměřené hodnoty teploty do požadovaného registru a převádí ji do tvaru vhodného k zobrazení na HMI panelu.

Čtvrtý podprogram pojmenovaný Řízení již ovládá celý cyklus popsany v předchozí kapitole. Obsahuje například řízení teploty pomocí PID regulátoru a časovač pro ukončení cyklu.

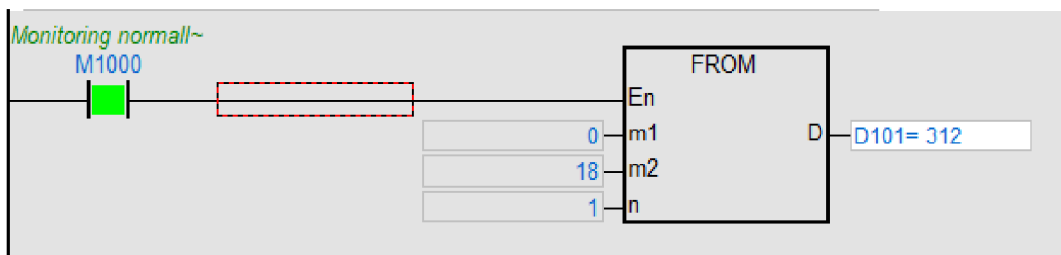
### 3.3 Vývojové prostředí

Vývoj a testování programů pro PLC Delta probíhá v prostředí ISPSOft. Vývojové prostředí podléhá normě IEC 61131-3 a nabízí 5 programovacích jazyků: Ladder Diagram, Function Block, Sequential function chart, Instruction list a Structured text.

### 3.4 Hlavní funkce programu

#### Měření teploty

K měření teploty je použit analogový modul se čtyřmi vstupy pro teploměry Pt100. K získání informace o aktuální teplotě byla použita funkce FROM, zobrazena na obrázku 2.



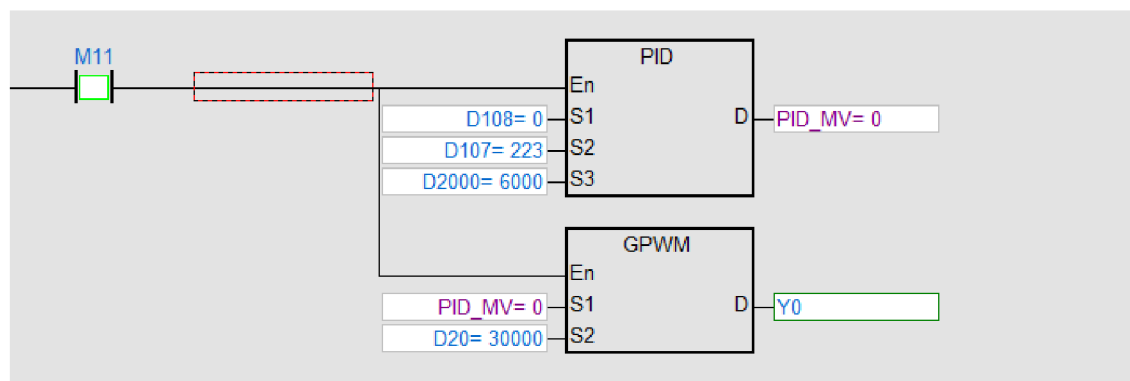
Obr. 2: Funkce FROM

V levé části bloku FROM jsou zadány vstupní informace. En je binární vstup, kde při logické 1 funkce probíhá, k tomuto slouží funkce M1000, která je permanentně sepnutá. Vstup m1 označuje číslo přidavného modulu a m2 číslo registru, ze kterého informace pochází. Písmeno n značí délku informace, v tomto případě 1 word (slovo).

V pravé části je jediný výstup D, který označuje kam se daná informace zapíše, v tomto případě je to registr D101.

#### PID regulátor

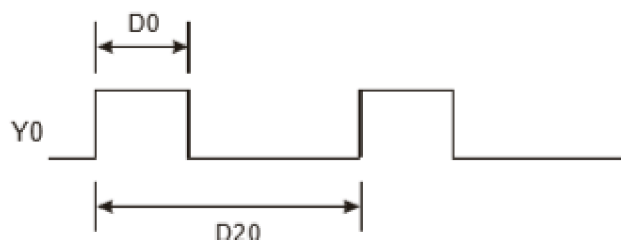
PID regulátor slouží k přesné regulaci teploty. Kombinuje tři regulátory: proporcionální, integrační a derivační. Vstupem je regulační odchylka, tedy rozdíl mezi požadovanou hodnotou a skutečnou hodnotou regulované veličiny. Výstupem je akční veličina, která představuje hodnotu zásahu do regulované soustavy. Obrázek 3 zobrazuje PID regulátor a pulzně šířkovou modulaci signálu akční veličiny.



Obr. 3: PID regulátor a pulzně šířková modulace

Aktivací binárního registru M11 se spustí funkce PID regulátoru a pulzně šířkové modulace. Vstup S1 regulátoru obsahuje požadovanou hodnotu regulované veličiny, S2 skutečnou hodnotu regulované veličiny a S3 obnovovací čas v milisekundách. Výstup D obsahuje akční veličinu.

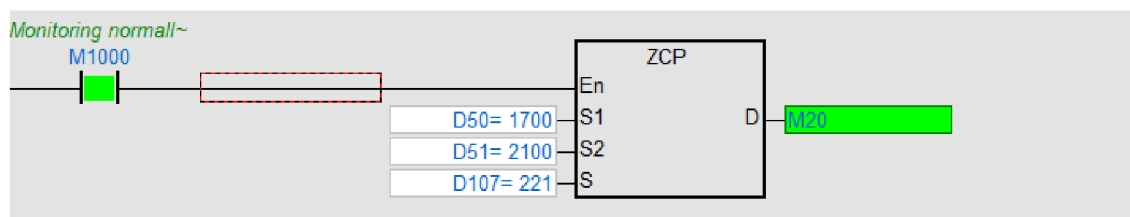
Pulzně šířková modulace převádí spojitou hodnotu akční veličiny (vstup S1) na binární signál, který ovládá akční člen topení, v tomto případě přepíná mezi nízkým a vysokým výkonem plynového hořáku. Vstup S2 udává délku jednoho cyklu v milisekundách viz Obrázek 4.



Obr. 4: Cyklus pulzně šířkové regulace [2]

### Zone compare

Funkce Zone compare je použita k hlídání mezních stavů teploty. Spodní limit hlídané funkce je nastaven na teplotu o 10 stupňů celsia nižší, než je požadovaná teplota. Po jeho dosažení se spouští odpočet času cyklu. Horní limit je nastaven na teplotu o 20 stupňů celsia vyšší, než je požadovaná hodnota. Tato hodnota má ochrannou funkci proti přehřátí.



Obr. 5: Funkce Zone compare



## 4 VIZUALIZACE POMOCÍ HMI

Operátorský panel slouží ke konfiguraci a ovládání celé pece. Vizualizace a ovládání by mělo být jednoduché a přehledné, aby zbytečně nekladlo nároky na operátora. Operátorský panel obsahuje 5 obrazovek, mezi kterými je možné kdykoli přepínat.

### 4.1 Vývojové prostředí

Pro návrh a konfiguraci operátorských panelů slouží vývojové prostředí DOPSoft. Umožňuje tvorbu jednotlivých obrazovek za použití velkého množství vstupních nebo zobrazovacích funkcí. Obsahuje různá tlačítka, klávesnice pro zadávání textu a čísel, displeje pro zobrazování čísel i textu, analogové posuvníky a podobně. Dále obsahuje funkci History Buffer, která slouží k monitorování jakékoli proměnné v PLC a ukládá její hodnotu na flash disk nebo SD kartu v předepsaných intervalech. V tomto případě byla tato funkce využita pro ukládání teploty uvnitř pece.

### 4.2 Automatický režim



Obr. 6: Obrazovka Automatický režim

Obrazovka Automatický režim slouží k zobrazování nastavených a naměřených hodnot, monitoringu chodu ventilátorů i hořáku, kontrolu uzavření dveří komory a informuje o zbývajícím čase do konce vypalovacího cyklu. Po nastavení teploty a vypalovacího času se tlačítkem START aktivuje vypalovací cyklus, který se sám ukončí po uplynutí vypalovacího času.

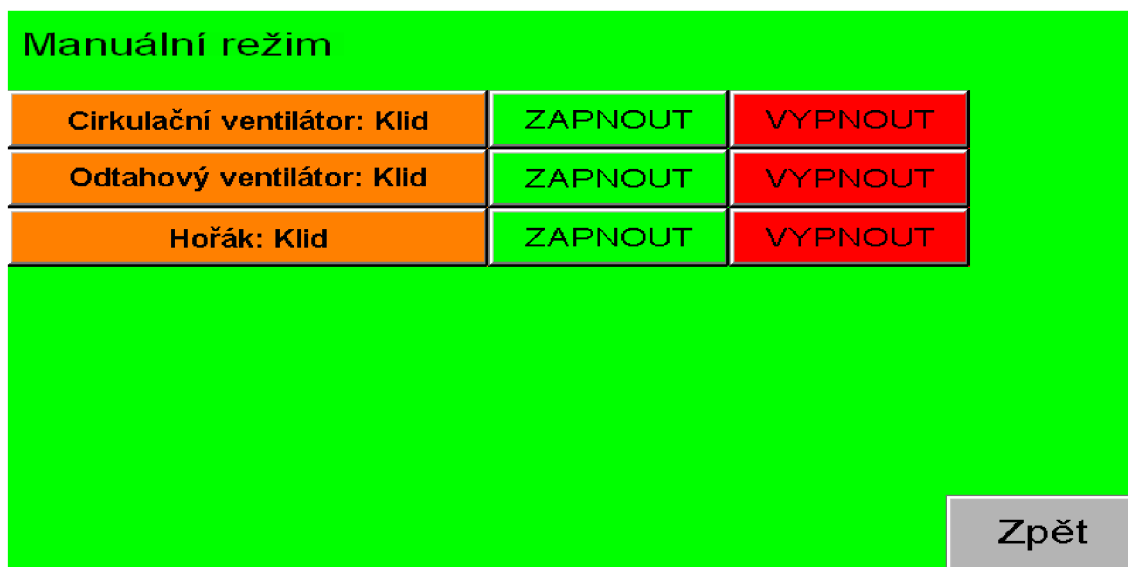
### 4.3 Nastavení



Obr. 7: Obrazovka Nastavení

Obrazovka nastavení obsahuje nastavení teploty vypalování, délku vypalovacího cyklu a mezní teplotu uvnitř spalovací komory, kdy se v případě překročení této teploty zastaví chod pece.

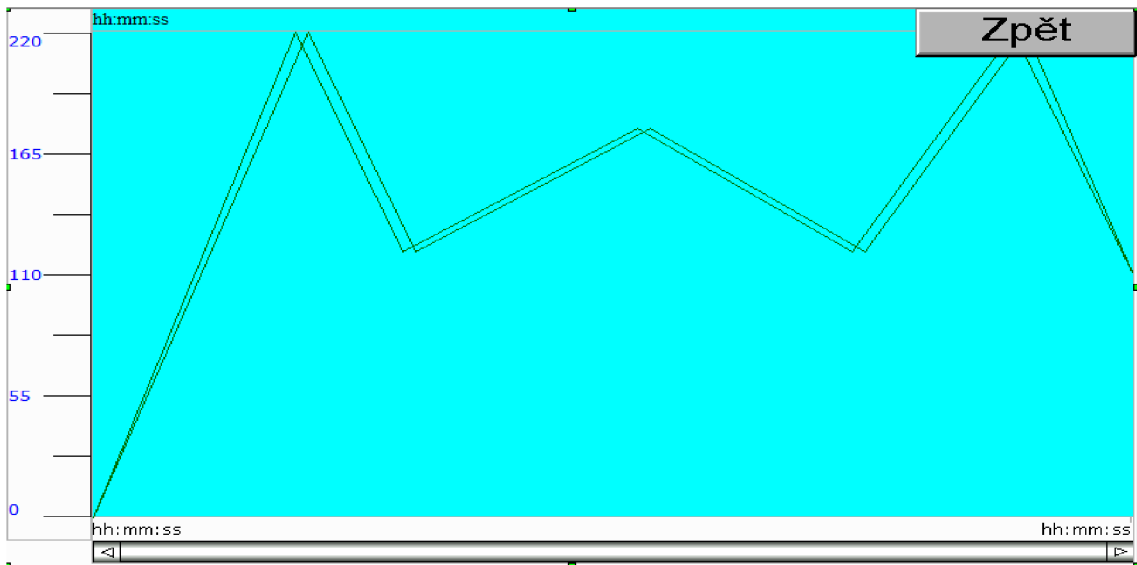
### 4.4 Manuální režim



Obr. 8: Obrazovka Manuální režim

Obrazovka manuální režim se prakticky využije jen při počátečním testování a ladění, nebo v případě vyhledávání poruchy. Obsahuje zobrazení stavu ventilátorů a hořáku a tlačítka pro jejich ruční zapnutí a vypnutí.

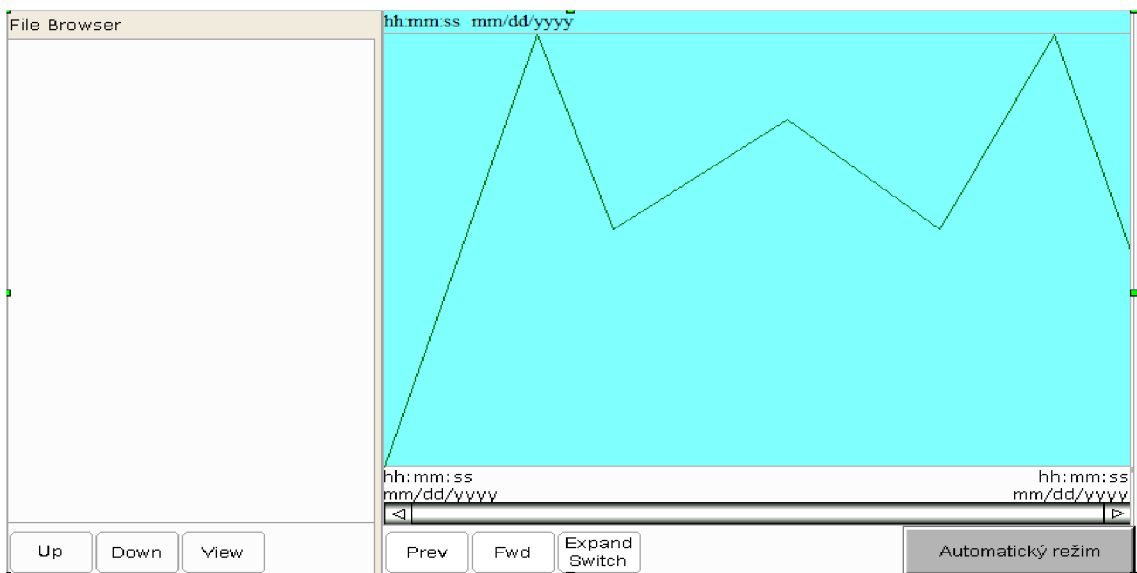
## 4.5 Průběh teploty



Obr. 9: Obrázovka Průběh teploty

Obrázovka průběh teploty obsahuje jednoduchý graf, který zobrazuje průběh teploty uvnitř vypalovací komory v čase a aktualizuje se každou vteřinu.

## 4.6 Historie vypalovacích cyklů



Obr. 10: Obrázovka Historie cyklů

Poslední obrazovka umožňuje prohlížení proběhlých vypalovacích cyklů, které jsou uloženy na SD kartě. Slouží k tomu jednoduchý prohlížeč souborů. Soubory se ukládají s názvem obsahujícím datum a čas uložení, podle kterého můžeme jednoduše vyhledat cyklus z minulosti, který je potřeba.

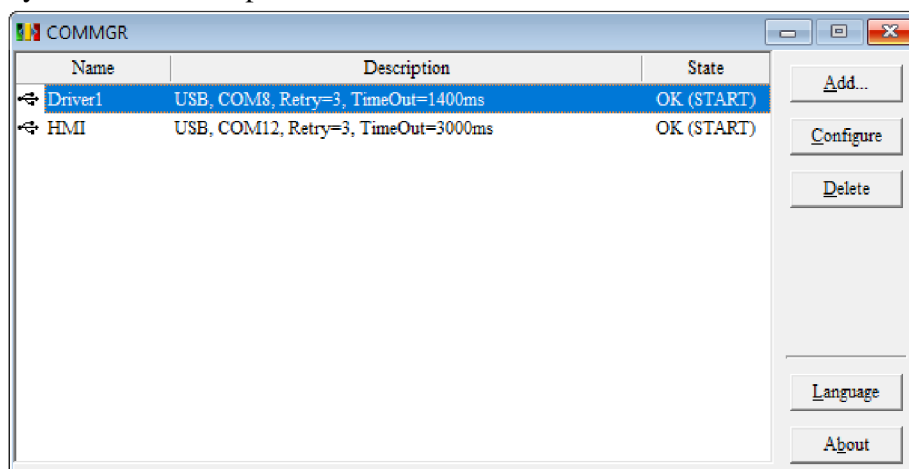
## 5 ZAPOJENÍ A OŽIVENÍ

V prvním kroku bylo promyšleno rozmístění jednotlivých komponentů ve skříni rozvaděče. S ohledem na rozměry jednotlivých přístrojů byly rozmístěny rozvaděčové kanály pro kabely a našroubovány DIN lišty. Do dveří rozvaděče byl vyřezán otvor pro umístění operátorského panelu. Po osazení přístrojů na lišty proběhlo jejich zapojení. Podrobná schémata jsou umístěna v příloze.

Dále následovalo ověření správnosti zapojení pomocí akustické funkce multimetru, tzv. prozvonění. V případě spojení měřících hrotů se rozezná akustický signál. Postupně jsou měřeny jednotlivé svorky na sebe navazujících přístrojů a měl by se rozeznat signál.

Po kontrole správnosti zapojení následuje připojení do sítě a první spuštění. Jak PLC tak i HMI panel jsou připojeny k počítači, ze kterého se programují, pomocí USB kabelů. Po prvním spuštění bylo nakonfigurováno základní nastavení HMI panelu, nastavena IP adresa a maska pro komunikaci s PLC pomocí ethernetu.

K nastavení komunikace mezi počítačem a zařízeními Delta se používá konfigurator COMMGR, který po nastavení typu připojení, počítačového portu a hodnot povolených zpoždění zajišťuje funkci driveru. Po tomto nastavení je již možné nahrát programy do PLC a HMI panelu.



Obr. 11: Konfigurator komunikace COMMGR

## 6 TESTOVÁNÍ A LADĚNÍ PID REGULÁTORU

Z důvodu zpoždění ve výrobě konstrukce pece, zejména způsobeného zpožděním v dodávce cirkulačního ventilátoru bylo nutné vymyslet alternativu, která umožní testování řízení pece, a to zejména při regulaci teploty uvnitř pece.

Bylo rozhodnuto pro použití plechového boxu osazeného teploměry Pt100 a jako simulátor dvoustupňového plynového hořáku byly s úspěchem použity dvě elektrické horkovzdušné pistole. Jedna nastavena na nízký výkon, simulující nízký výkon hořáku a druhá na vysoký, společně nahrazující vysoký výkon hořáku.

## 6.1 Nastavení parametrů PID smyčky

PID regulátor umožňuje nastavovat tři parametry. Zesílení, integrační časovou konstantu a derivační časovou konstantu. Tyto parametry ovlivňují výpočet akční veličiny. Cílem je tedy nastavit tyto tři parametry tak, aby regulátor na základě regulační odchylky určil správně akční veličinu a to vedlo ke snížení regulační odchylky ideálně na nulu. [4]

Zde použitý regulátor je popsán rovnicí (1):

$$MV = K_p * E(t) + K_I * E(t) \frac{1}{s} + K_D * PV(t)S \quad (1)$$

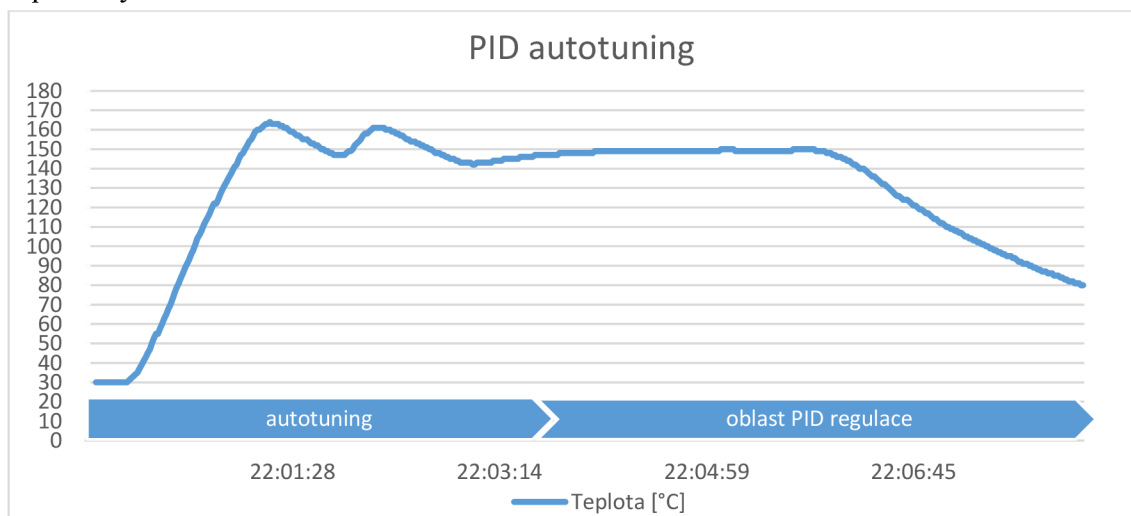
Kde MV je akční veličina,  $K_p$  proporcionální zesílení, E poruchová veličina,  $K_I$  integrační časová konstanta,  $E(t) \frac{1}{s}$  integrovaná poruchová veličina,  $K_D$  derivační časová konstanta,  $PV(t)S$  derivace regulační odchylky. [2]

## 6.2 Identifikace soustavy pomocí funkce Autotuning

Funkce PID poskytovaná PLC nabízí automatické ladění konstant  $K_p$ ,  $K_I$  a  $K_D$ . Funkce PID automaticky zabere 20 datových registrů následujících za registrem (jakýmkoliv zvoleným) pro nastavení vzorkovacího intervalu, v tomto případě registry od D2000 do D2020.

Registr D2000 tedy slouží pro nastavení vzorkovacího času. V manuálu bylo zjištěno, že registry D2001 až D2003 slouží k zápisu PID konstant, D2004 k výběru režimu řízení (automatické, autotuning). Další registry nastavují limity hodnot nebo slouží k systémovým účelům.

V první části programu, inicializaci se tedy nastaví zápis hodnoty 3 do registru D2004, která aktivuje automatické zjištění optimálních parametrů PID. Poté se již může poprvé spustit vypalovací cyklus. Průběh teploty v čase je na obrázku 12. Požadovaná teplota byla nastavena na 150°C.

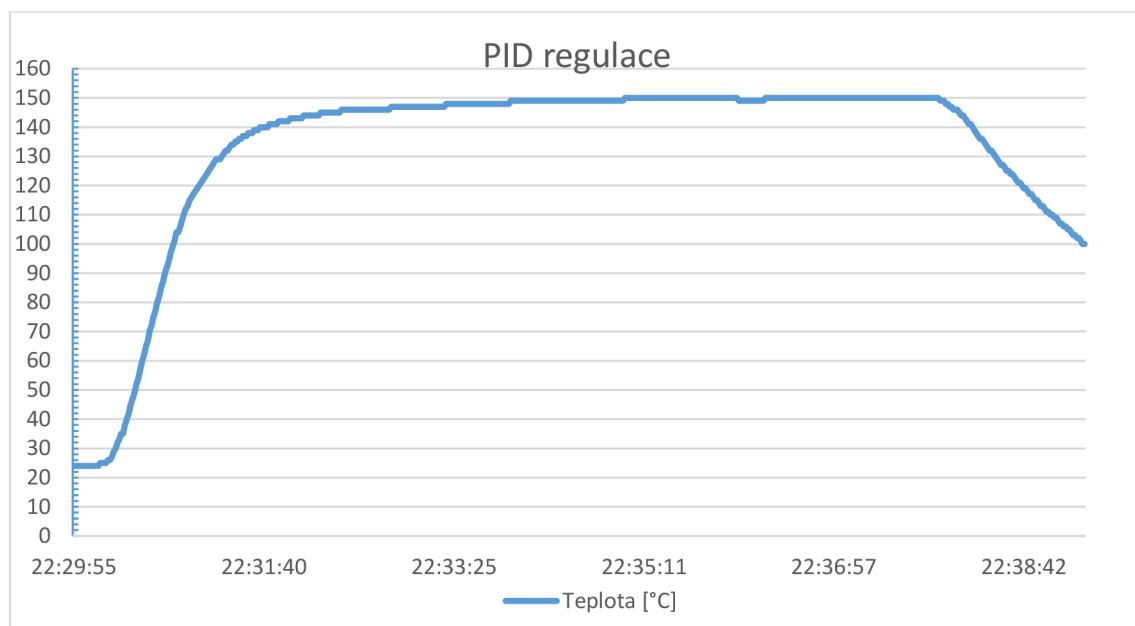


Obr. 12: Průběh teploty, PID autotuning

V první části obrázku 12 je vidět oblast výrazného kolísání teploty. Zde regulátor provádí identifikaci soustavy, na základě které navrhl sadu parametrů vhodných pro regulaci této konkrétní regulované soustavy.

Výsledky autotuning:  $K_p=551$ ,  $K_I=137$ ,  $K_D = -6$

### 6.3 Test nastavených parametrů



Obr. 13: Průběh teploty, PID regulace

Z obrázku 13 je patrné, že již neobsahuje kmitavou část, tak jako při vykonání autotuning. Zde již pracuje PID regulace standardním způsobem od začátku ohřevu pece.

### 6.4 Zhodnocení regulace

Hlavní dva ukazatele kvality regulace jsou doba regulace  $t_s$  a relativní překmit (přeregulování). Doba regulace se udává jako čas, kdy regulovaná veličina dosáhne pásma  $\pm 5\%$  od požadované hodnoty a už v ní zůstane.[3]

Z dat v obrázku 15 je patrné, že doba regulace je 2 minuty a nemá žádný překmit. Regulace tedy vyhovuje pro účely vypalování práškových barev.

## 7 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo navrhnout a realizovat řízení vypalovací pece na práškové barvy za pomoci PLC a HMI panelu.

V první části práce byly deklarovány funkce pece a na jejich základě byly vybrány komponenty potřebné pro stavbu řídicího systému. Dále následoval návrh řídicího programu PLC, který obsahuje 4 podprogramy. První zajišťuje nastavení konstant na potřebné hodnoty, druhý kontroluje zakázané a poruchové stavy, třetí zajišťuje měření teploty a čtvrtý obsahuje PID regulátor a obstarává samotné řízení pece. Práce pokračuje návrhem vizualizace s využitím operátorského HMI panelu, který zároveň zajišťuje funkci ukládání průběhu vypalovací teploty do souboru na SD kartě. V předposlední části se práce zabývá zapojením všech komponent ve skříňovém rozváděči a jejich prvním oživením. Nakonec se testují nastavené funkce, zejména PID regulace.

Myslím, že výsledek splňuje požadavky na všechny funkce pece, kvalitu regulace a jednoduchost ovládání, včetně zápisu průběhu teplot. Subjektivně mě v tuto chvíli nenapadá, co by bylo vhodné realizovat jinak. Vzhledem k testování na velmi zjednodušeném modelu pece předpokládám, že reálná pec bude mít mnohem pomalejší reakci na akční veličinu a přesnost regulace se mírně sníží.





## 8 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ŠMEJKAL, Ladislav a Marie MARTINÁSKOVÁ. *PLC a automatizace*. Praha: BEN - technická literatura, 1999. ISBN 80-86056-58-9.
- [2] Delta Electronics. *The PID function (Examples of temperature control of an oven)*. Dostupné také z: <http://www.deltaww.com/services/DownloadCenter2.aspx?secID=8&pid=3&tid=0&CID=06&typeID=3&dataType=&key=the%20pi&hl=en-US>
- [3] VÍTEČEK, Antonín a Miluše VÍTEČKOVÁ. *Zpětnovazební řízení mechatronických systémů*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2013. ISBN isbn978-80-248-3232-6.
- [4] VÍTEČKOVÁ, Miluše a Antonín VÍTEČEK. *Vybrané metody seřizování regulátorů*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2011. ISBN isbn978-80-248-2503-8.
- [5] ŠMEJKAL, Ladislav. *PLC a automatizace*. Praha: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-087-3.
- [6] KRŮŽ, Michal. *Praktické pomůcky a tabulky pro elektrotechniky*. Třetí - aktualizované vydání. Pardubice: IN-EL, 2017. Elektro (IN-EL). ISBN 978-80-87942-26-0.
- [7] Delta Electronics. *DOPSoft User Manual*. 2015. Dostupné také z: <http://www.deltaww.com/services/DownloadCenter2.aspx?secID=8&pid=3&tid=0&CID=06&typeID=3&dataType=&key=dopsoft&hl=en-US>
- [8] Delta Electronics. *DVP-ES2/EX2/SS2/SA2/SX2/SE&TP Operation Manual*. 2018. Dostupné také z: <http://www.deltaww.com/services/DownloadCenter2.aspx?secID=8&pid=3&tid=0&CID=06&typeID=3&dataType=&key=dvp&hl=en-US>



## **9 SEZNAM OBRÁZKŮ**

- Obrázek 1: Funkční schéma pece
- Obrázek 2: Funkce FROM
- Obrázek 3: PID regulátor a pulzně šířková modulace
- Obrázek 4: Cyklus pulzně šířkové regulace
- Obrázek 5: Funkce Zone Compare
- Obrázek 6: Obrazovka Automatický režim
- Obrázek 7: Obrazovka Nastavení
- Obrázek 8: Obrazovka Manuální režim
- Obrázek 9: Obrazovka Průběh teploty
- Obrázek 10: Obrazovka Historie cyklů
- Obrázek 11: Konfigurátor komunikace COMMGR
- Obrázek 12: Průběh teploty, PID autotuning
- Obrázek 13: Průběh teploty, PID regulace

## **10 SEZNAM TABULEK**

- Tabulka 1: Akční členy
- Tabulka 2: Senzory
- Tabulka 3: Porovnání PLC
- Tabulka 4: Porovnání modulů
- Tabulka 5: Porovnání HMI panelů
- Tabulka 6: Porovnání zdrojů
- Tabulka 7: Teploměry
- Tabulka 8: Stykače
- Tabulka 9: Motorové spouštěče
- Tabulka 10: Hořáky
- Tabulka 11: Rozváděčová skříň



## 11 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1: Vývojový diagram cyklu

Příloha 2: Výkres napájení

Příloha 3: Výkres zapojení PLC

Příloha 4: Výkres zapojení ventilátorů

Příloha 5: Výkres zapojení A/D modulu a HMI

Příloha 6: Ukázka podprogramu Inicializace

Příloha 7: Ukázka podprogramu Errorcheck

Příloha 8: Ukázka podprogramu Měření

Příloha 9: Ukázka podprogramu Řízení

Příloha 10: Foto rozvaděče uvnitř

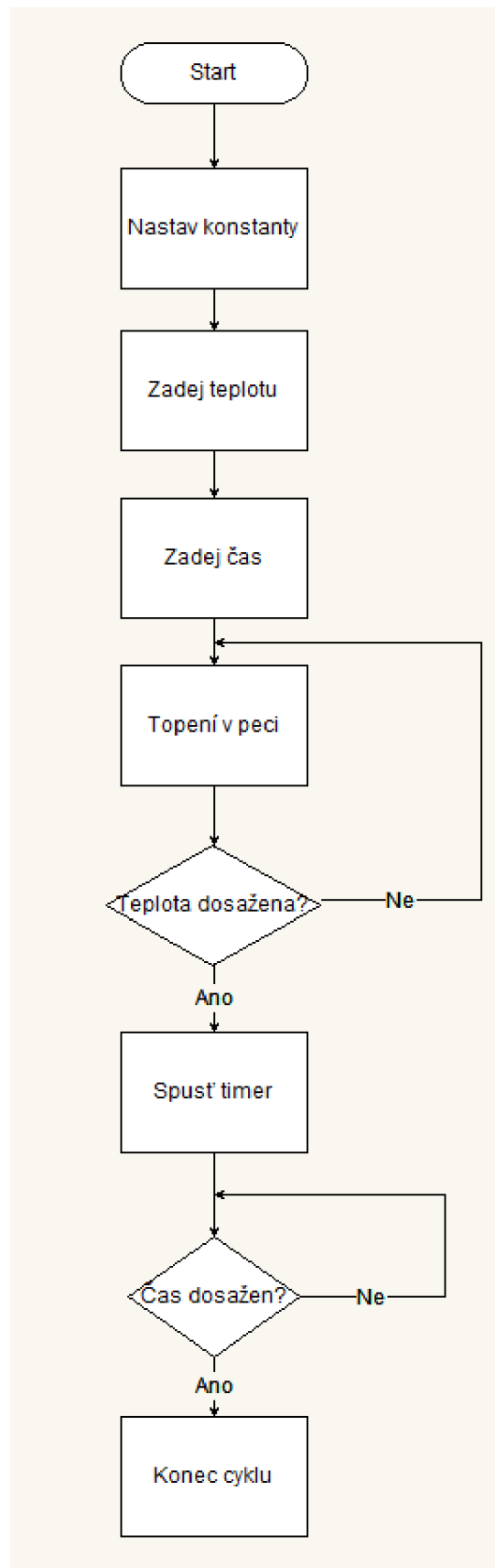
Příloha 11: Foto ovládacího panelu

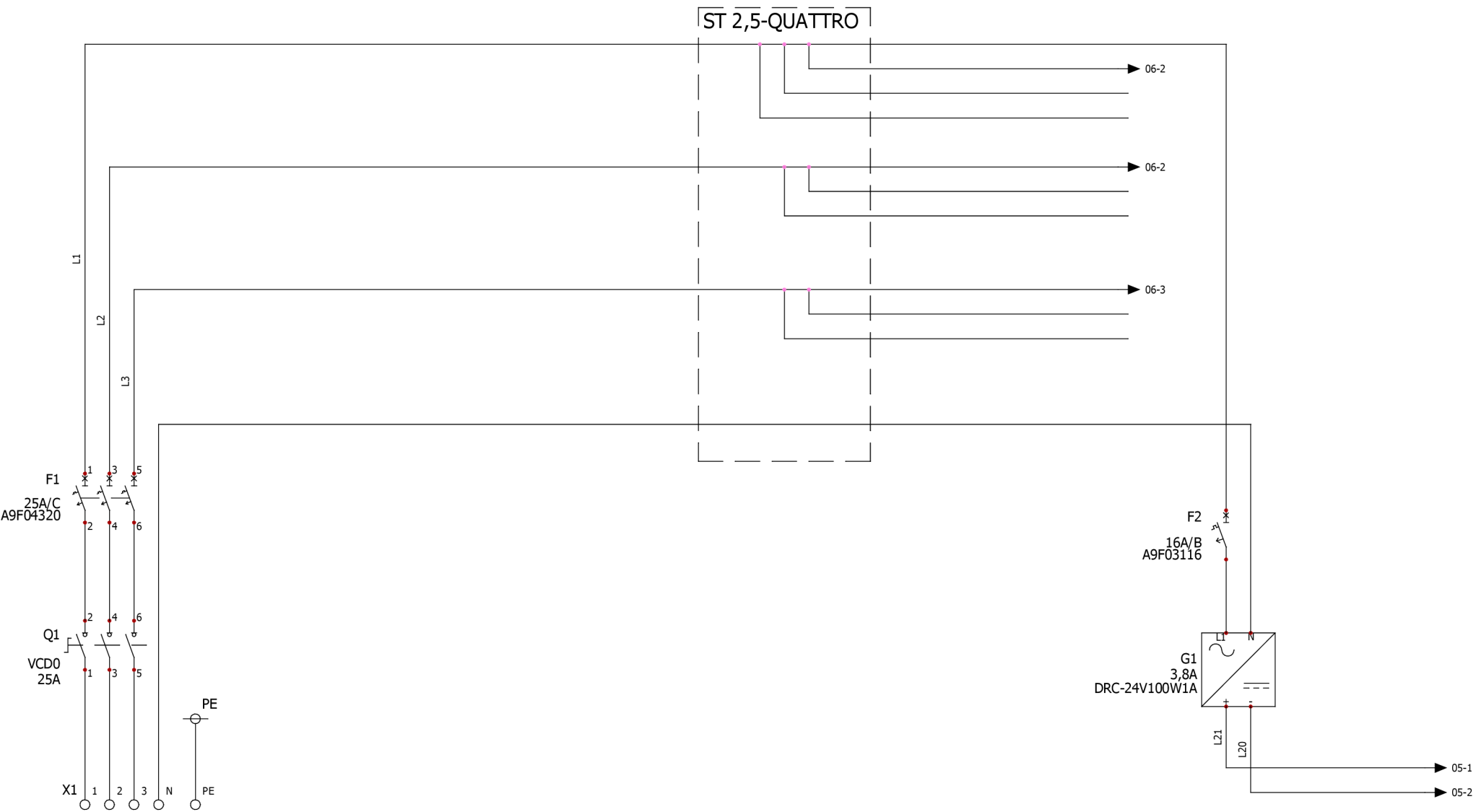
CD – obsahem CD je:

Řízení vypalovací pece.pdf	
pec_program.isp	(program PLC)
HMI_pec.dps	(program HMI)



# VÝVOJOVÝ DIAGRAM





## Napájení

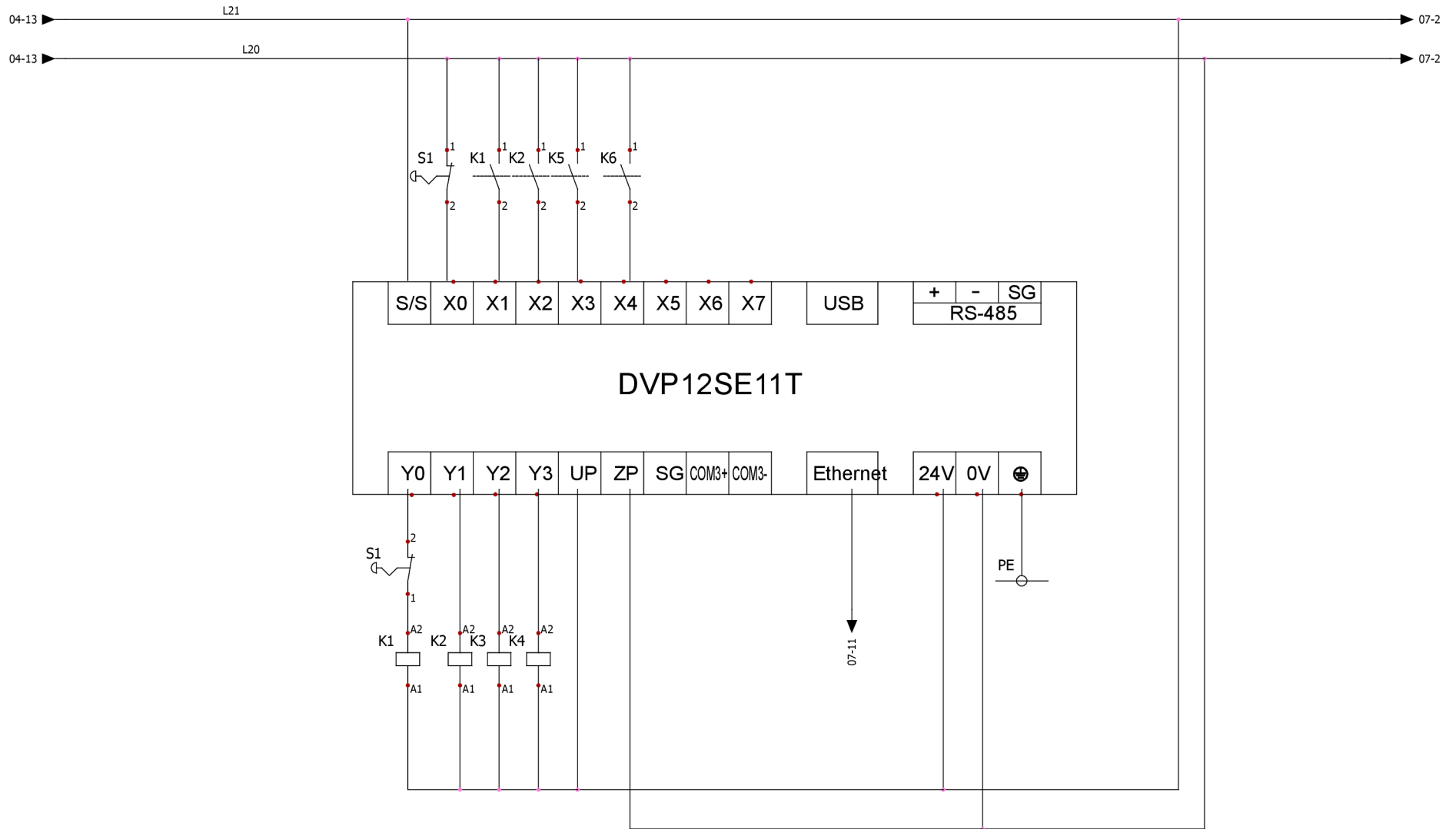
REV.	DATE	NAME	CHANGES	REVISION
0	11.04.2019	Viskot		0
				SCHEME
				04

CONTRACT: LOCATION: L1 Hlavní elektrická skříň

Údaje uživatele 1

Údaje uživatele 2



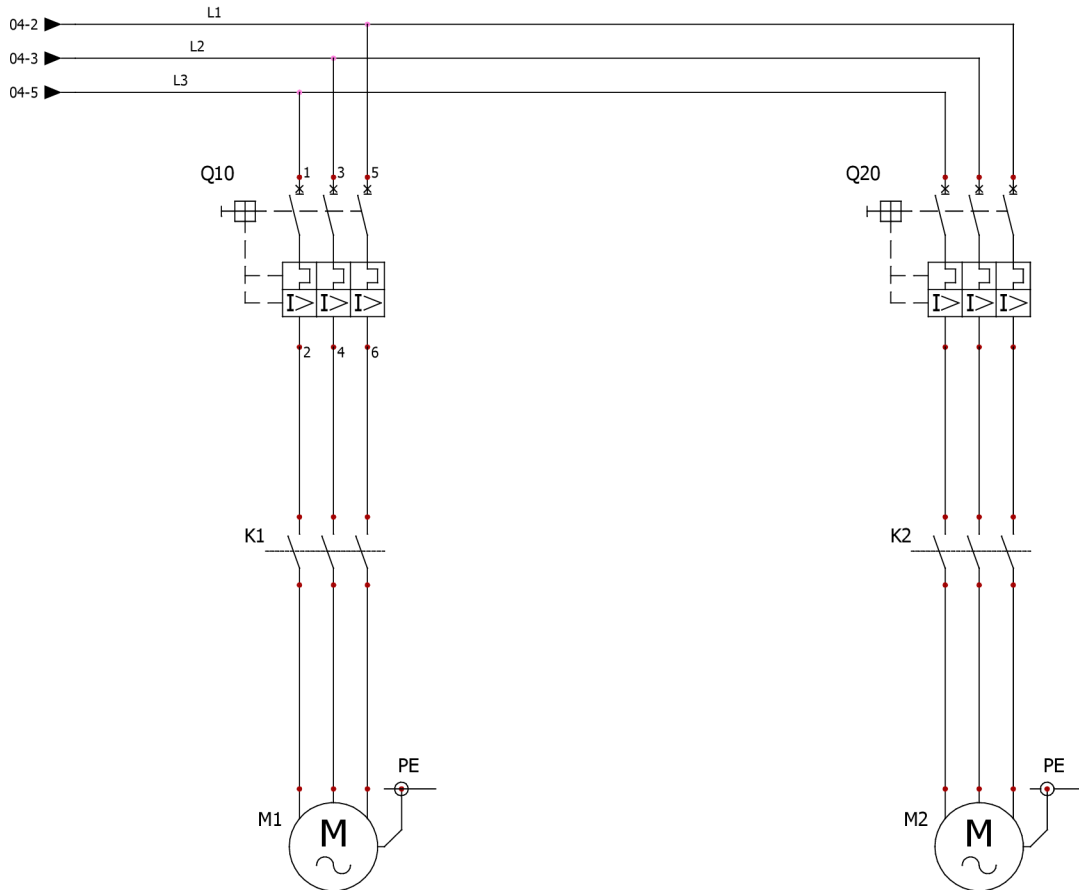


CPU

				REVISION
0	20.04.2019	Viskot		0
REV.	DATE	NAME	CHANGES	SCHEME
			Údaje uživatele 2	05

CONTRACT: LOCATION: L1 Hlavní elektrická skříň

SOLIDWORKS Electrical



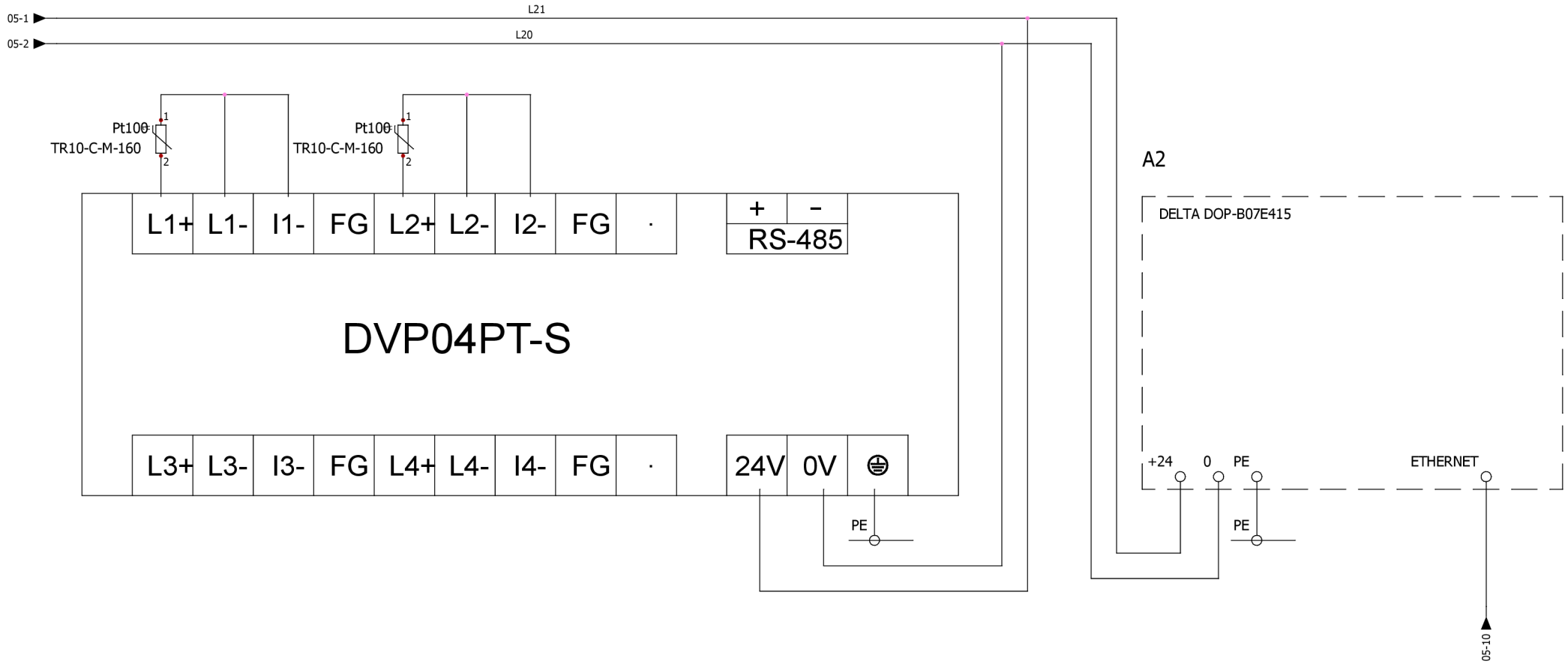
Ventilátory

CONTRACT:

LOCATION: L1  
Hlavní elektrická skříň

REV.	DATE	NAME	CHANGES
0	20.04.2019	Viskot	
Údaje uživatele 2			

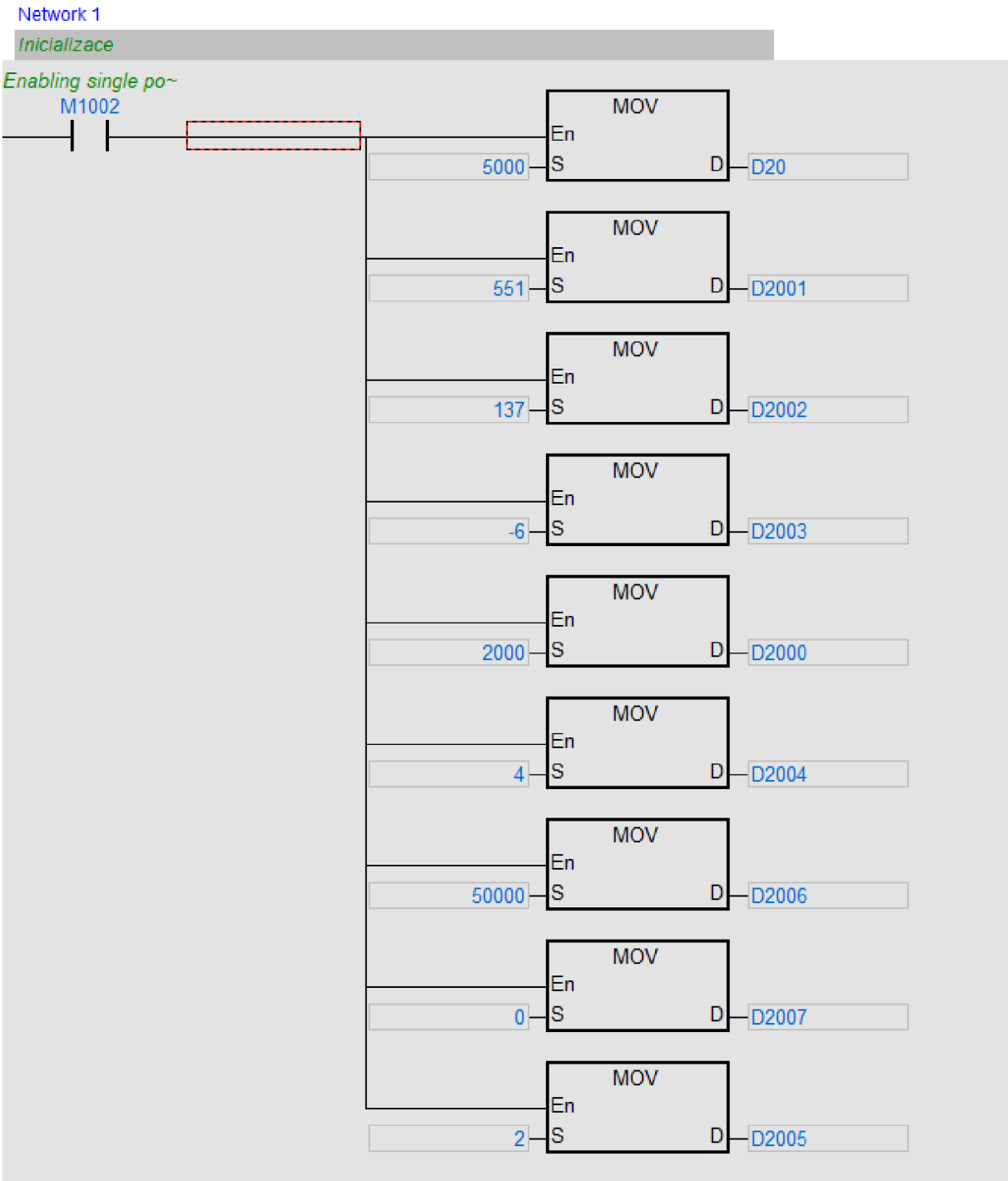
REVISION  
0  
SCHEME  
06



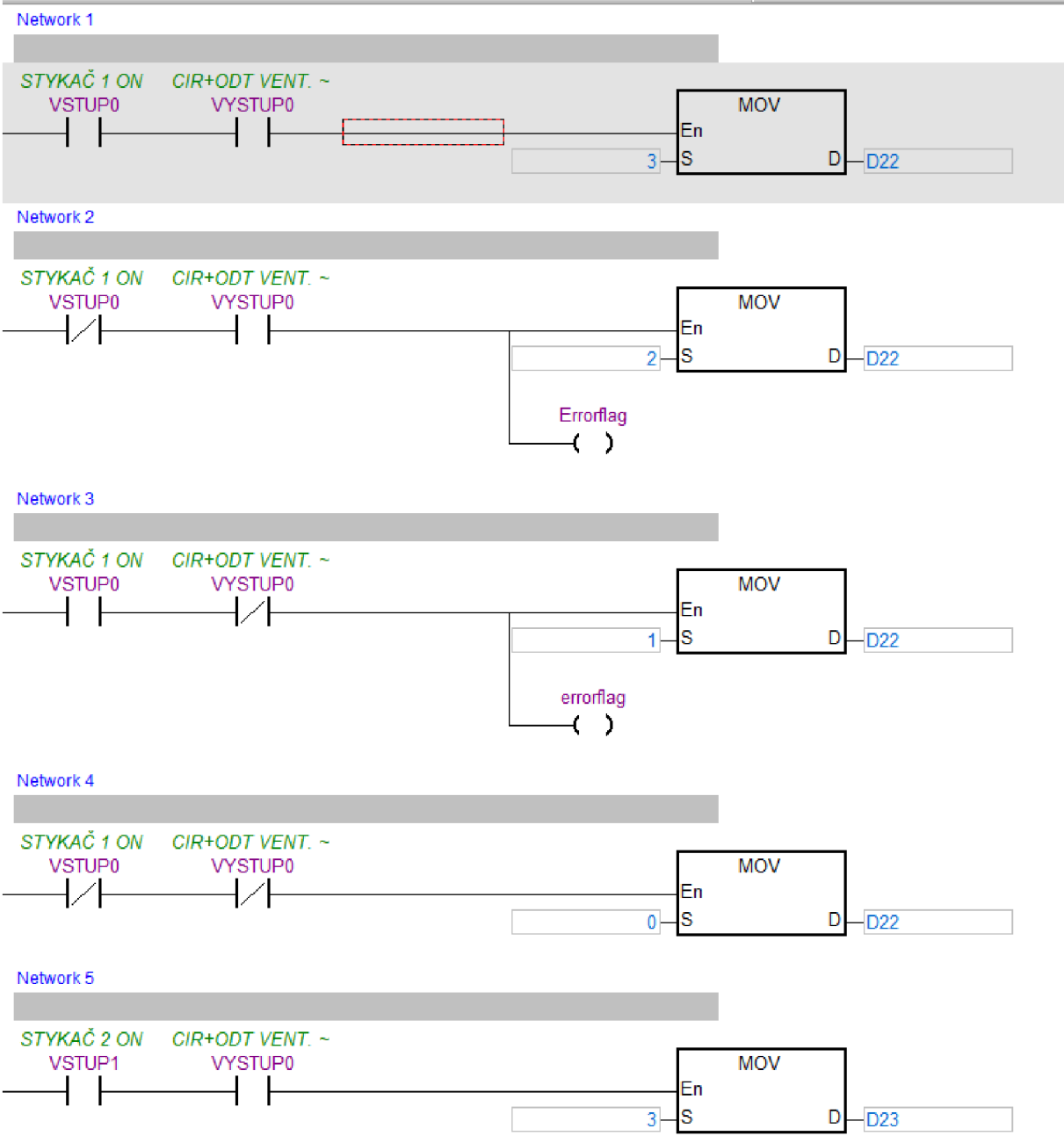
A/D MODUL + HMI

CONTRACT:		LOCATION: L1		Hlavní elektrická skříň		Údaje uživatele 1		Údaje uživatele 2		REVISION
										0
REV.	DATE	NAME		CHANGES				SCHEME		
0	26.04.2019	Viskot						07		

# Ukázka podprogramu Inicializace



# Ukázka podprogramu Errorcheck

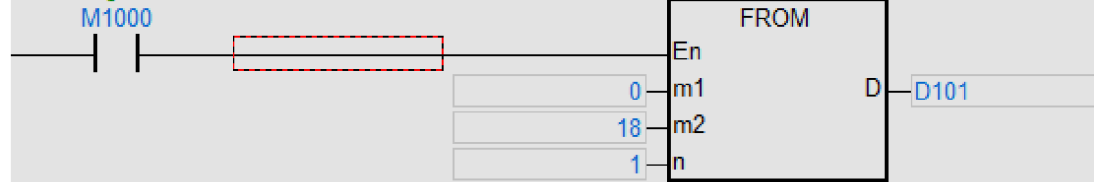


# Ukázka podprogramu Měření

## Network 1

čtení teploty z channel 1

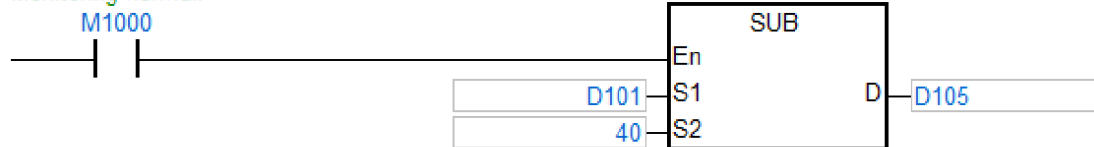
Monitoring normal~



## Network 2

offset teploty

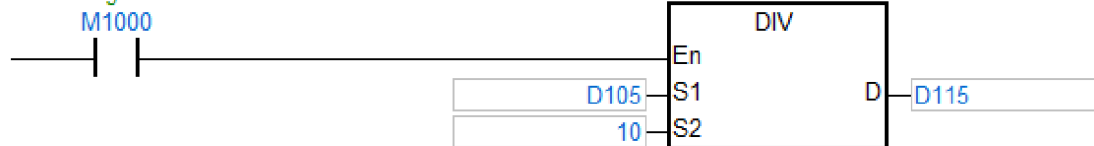
Monitoring normal~



## Network 3

dělení

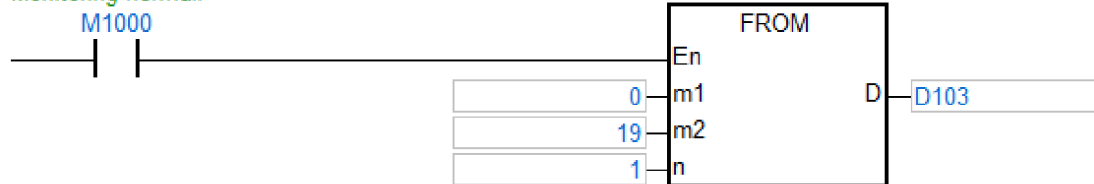
Monitoring normal~



## Network 4

čtení teploty z channel 2

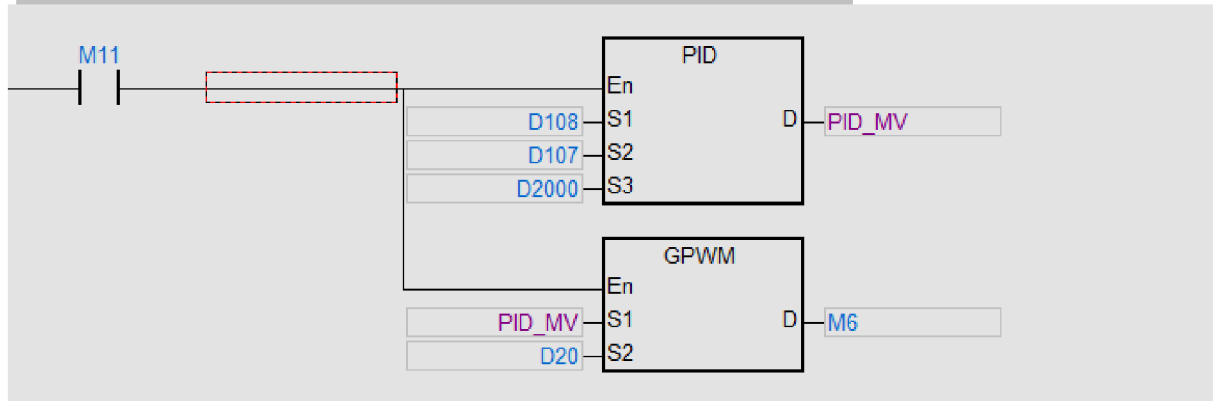
Monitoring normal~



# Ukázka podprogramu Řízení

## Network 5

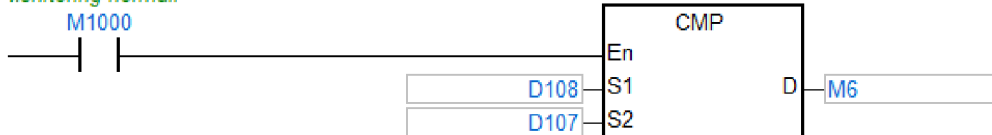
*PID + pulzně fázová modulace*



## Network 6

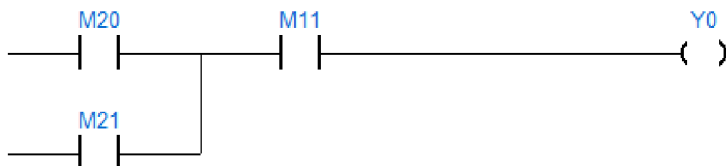
*test, neaktivní*

*Monitoring normall~*



## Network 7

*spínání nízkého výkonu hořáku*

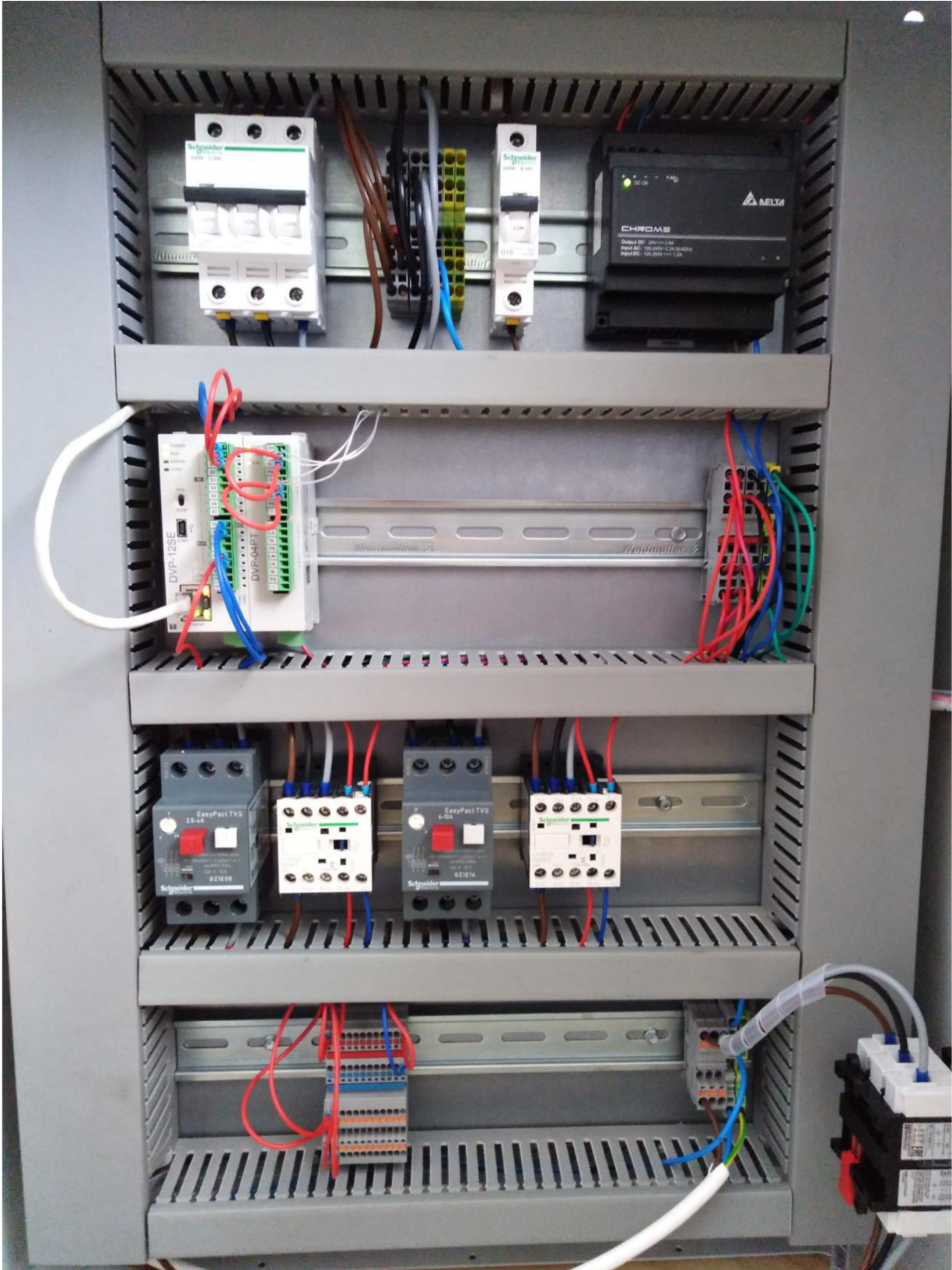


## Network 8

*spínání vysokého výkonu hořáku*



Skříň rozváděče





## Ovládací panel

