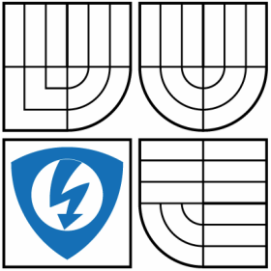


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

# REGULÁTOR HORKÝCH VTOKŮ PRO VSTŘIKOVACÍ FORMY PLASTU

CONTROLLER OF HOT RUNNER FOR INJECTION MOLDS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Eduard Chrenka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Radek Štohl, Ph.D.

BRNO 2016



# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Kybernetika, automatizace a měření**

Ústav automatizace a měřicí techniky

**Student:** Bc. Eduard Chrenka

**ID:** 77673

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2015/16

**NÁZEV TÉMATU:**

## **Regulátor horkých vtoků pro vstřikovací formy plastu**

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

1. Proveďte literární rešerši metod návrhu parametrů regulátorů
2. Realizujte soustavu regulátorů pro 56 regulačních smyček (zón).
3. Navrhněte a realizujte komunikaci mezi jednotlivými fyzickými regulátory.
4. Navrhněte a realizujte komunikační protokol (sít) s nadřazeným řídicím systémem.
5. Proveďte a vyhodnoťte testy navrženého řešení.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

Šimandl, M. Identifikace systémů a filtrace. Západočeská univerzita v Plzni. 2001. ISBN 80-7082-170-1.

Dle vlastního literárního průzkumu a doporučení vedoucího práce.

**Termín zadání:** 8.2.2016

**Termín odevzdání:** 16.5.2016

**Vedoucí práce:** Ing. Radek Štohl, Ph.D.

**Konzultant diplomové práce:**

**doc. Ing. Václav Jirsík, CSc., předseda oborové rady**

**UPOZORNĚNÍ:**

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové 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.

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně / Technická 3058/10 / 616 00 / Brno

## **Abstrakt**

Diplomová práce se zabývá realizací regulátoru horkých vtoků pro vstřikovací formy plastu s maximálním počtem regulovaných zón 56. V první části jsou popsány existující řešení dané problematiky. V další části jsou popsány principy měření teploty termoelektrickými senzory včetně jejich linearizace, jsou popsány komunikační protokoly Modbus a EUROMAP17. Je provedena identifikace systému topné zóny následovaná vývojem měřicího modulu a silové části. Proces vývoje je rozdělen do tří částí: koncepce systému, návrh hardwaru a vývoj softwaru. Regulátor se skládá z měřicích modulů sloužících pro sběr dat a ovládání výkonových prvků pro řízení výkonu topných těles. Veškerý potřebný výpočetní výkon je soustředěn do řídicího PC. Všechny části regulátoru horkých vtoků jsou realizovány s ohledem na minimální náklady.

## **Klíčová slova**

MODBUS, EUROMAP, SSR, regulátor, auto-tuning, RS485, termoelektrický senzor, identifikace, linearizace, A/D převodník.

## **Abstract**

The thesis focuses on implementation of a hot runner controller for injection molds for plastic materials with a maximum number of 56 regulated zones. The first part of the thesis deals with already existing and used solutions of the given subject. The following part of the thesis describes the principles of temperature measurement by means of thermoelectric sensors, including their linearization as well as communication protocols MODBUS, EUROMAP 17. The identification of a regulated system ( heating zone) has been carried out before the hardware design. The development process is divided into some parts : system conception, hardware design, software development. The controller consists of measuring modules designed to collect data and handle power controllers for management of performance of heating elements. The necessary calculation power is integrated into the controlling computer. All parts of a hot runner controller are implemented taking into account the costs.

## **Keywords**

MODBUS, EUROMAP, SSR, regulator, auto-tuning, RS485, thermoelectric sensor, identification, linearization, A/D converter.

### **Bibliografická citace:**

CHRENKA, E. *Regulátor horkých vtoků pro vstříkovací formy plastu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 107s. Vedoucí diplomové práce byl Ing. Radek Štohl, Ph.D.

## **Prohlášení**

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Regulátor horkých vtoků pro vstřikovací formy plastu jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové 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 diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: **16. května 2016**

.....  
podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Radku Štohlvi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne: **16. května 2016**

.....  
podpis autora

# Obsah

1	Úvod.....	13
2	Rešerše používaných metod regulace horkých vtoků.....	14
3	Návrh koncepce zařízení .....	16
3.1	Použití hotových modulů .....	17
3.2	Návrh vlastního zařízení .....	17
3.3	Komunikace mezi PC a nadřazeným systémem .....	18
3.3.1	Čtení parametrů z periferní jednotky. ....	20
3.3.2	Zápis parametrů do externí jednotky.....	21
3.4	Komunikace mezi PC a měřicími moduly .....	22
3.5	Rozhraní RS-485.....	26
3.6	Princip měření teploty termoelektrickými snímači .....	28
3.6.1	Kompenzace studeného konce termostatem .....	29
3.6.2	Kompenzace studeného konce kompenzační krabicí.....	30
3.6.3	Kompenzace studeného konce izotermickou svorkovnicí .....	30
3.7	Linearizace termočlánků .....	31
3.7.1	Analogová linearizace.....	31
3.7.2	Linearizace založená na korekční tabulce.....	32
3.7.3	Linearizace založená na interpolaci .....	32
3.8	Měření elektrického napětí a proudu.....	33
3.9	Regulace.....	35
3.10	Automatické nastavování parametrů regulátorů .....	38
3.11	Identifikace parametrů soustavy .....	40
3.11.1	Sběr naměřených dat.....	40
3.11.2	Metoda identifikace.....	41
3.11.3	Postup identifikace soustavy .....	42
4	Návrh měřicího modulu.....	46
4.1	Návrh mikrokontroléru a přílehlých obvodů.....	47
4.2	Návrh části snímání termočlánků.....	49
4.2.1	Komunikace A/D převodníku sběrnici I <sup>2</sup> C. ....	50
4.2.2	Zapojení MC3424 a vstupních obvodů .....	51
4.3	Návrh části měření teploty izotermické svorkovnice .....	54
4.4	Návrh měření elektrického napětí a proudu .....	55
4.5	Návrh ovládání SSR.....	59

4.6	Návrh rozhraní RS485.....	64
4.7	Návrh zdroje.....	65
4.8	Návrh desky plošných spojů .....	69
5	Implementace firmware měřicího modulu .....	71
5.1	Měření termočlánků .....	72
5.2	Měření teploty izotermické svorkovnice.....	72
5.3	Měření napětí RMS.....	74
5.4	Komunikace Modbus .....	76
5.4.1	Obsluha přerušení od sériové linky při příjmu bajtu.....	76
5.4.2	Měření časového intervalu $t_{1.5}$ a $t_{3.5}$ .....	76
5.4.3	Přepínání směru toku dat pro RS485.....	76
5.4.4	Příjem a zpracování zprávy .....	77
5.4.5	Funkce pro výpočet CRC .....	79
5.4.6	Podporované kódy funkcí .....	80
5.5	Řízení výstupů pro SSR .....	82
6	Návrh hardware rozvaděče .....	83
7	Program pro PC .....	87
8	Experimentální ověření .....	92
8.1	Měření termočlánků .....	92
8.2	Měření napětí .....	93
8.3	Auto-tuning .....	95
8.4	Regulace.....	96
9	Závěr.....	98



# Seznam obrázků

Obrázek 1.1 - Řez horkým vtokem [1].....	13
Obrázek 2.1 - Řešení pomocí standardních regulátorů teploty [3] .....	14
Obrázek 2.2 - Řešení regulátorů s pokročilými funkcemi [4].....	15
Obrázek 3.1 - Konektory horkých vtoků na vstřikovací formě.....	16
Obrázek 3.2 - Blokové schéma návrhu zařízení.....	18
Obrázek 3.3 - Příklad adresování kanálů s příkazy EUROMAP17 [2].....	22
Obrázek 3.4 - Příklady implementace protokolu Modbus [6].....	24
Obrázek 3.5 - RTU rámec zprávy [6].....	24
Obrázek 3.6 - Kategorie funkčních kódů protokolu Modbus [6] .....	26
Obrázek 3.7 - Zapojení komunikační sítě s rozhraním RS485 .....	27
Obrázek 3.8 - Schéma obvodu termoelektrického článku [7].....	28
Obrázek 3.9 - Zapojení termočlánku s použitím termostatu [7] .....	29
Obrázek 3.10 - Zapojení termočlánku s použitím kompenzační krabice [7] .....	30
Obrázek 3.11 - Zapojení termočlánku s použitím izotermické svorkovnice [7].....	30
Obrázek 3.12 - Charakteristiky termočlánků [7].....	31
Obrázek 3.13 - Analogová linearizace snímače [9] .....	31
Obrázek 3.14 - Linearizace pomocí tabulky [9].....	32
Obrázek 3.15 - Linearizace úsekovou interpolací [9] .....	32
Obrázek 3.16 - Linearizace interpolačním polynomem [9] .....	33
Obrázek 3.17 - Nepřímá metoda převodu AC/DC využívající špičkové hodnoty [10] .....	33
Obrázek 3.18 - Zapojení MTN a MTP [10] .....	34
Obrázek 3.19 - Struktura PSD regulátoru [11].....	36
Obrázek 3.20 - Struktura PSD s filtrací D-složky a s anti-windupem z rovnice (3.10) .....	37
Obrázek 3.21 - Zapojení relé ve zpětné vazbě auto-tuningu.....	38
Obrázek 3.22 - Průběh výstupní veličiny při relé ve zpětné vazbě .....	39
Obrázek 3.23 - Změřená přechodová charakteristika špičky vtokové soustavy při 50% skoku vstupní akční veličiny. ....	41
Obrázek 3.24 - Přechodová charakteristika systému druhého řádu [15].....	42
Obrázek 3.25 - Normovaná přechodová charakteristika .....	43
Obrázek 3.26 - Výřez začátku přechodové charakteristiky.....	44
Obrázek 3.27 - Aproximace přenosem druhého řádu s rozdílnými časovými konstantami [16] .....	44
Obrázek 4.1 - Blokové schéma měřícího modulu .....	46
Obrázek 4.2 - Blokové schéma MCU ATxmega [17].....	47

Obrázek 4. 4.3 - Zapojení mikroprocesoru ATxmega32A4 s přílehlými obvody .....	48
Obrázek 4.4 - Zapojení sběrnice I <sup>2</sup> C .....	51
Obrázek 4.5 - Základní zapojení obvodu MCP3424 [20] .....	52
Obrázek 4.6 - Typický diferenční a common-mode filtr [22] .....	53
Obrázek 4.7 - Filtr prvního řádu typu dolní propust termočláňkového vstupu .....	54
Obrázek 4.8 - Zapojení teplotního senzoru DS18B20 k MCU .....	55
Obrázek 4.9 - Blokové schéma vstupní úpravy a měřicí části U/I .....	56
Obrázek 4.10 - Filtr prvního řádu typu dolní propust napěťového vstupu.....	56
Obrázek 4.11 - Převodní tabulka proudových transformátorů JCXXF-XXXmA [24] .....	58
Obrázek 4.12 - Zapojení MTN pro tři fáze .....	58
Obrázek 4.13 - Princip fázového řízení.....	60
Obrázek 4.14 - Spínání s pevnou časovou bází [25] [26] .....	61
Obrázek 4.15 - Spínání s proměnlivou časovou bází [25] [26].....	61
Obrázek 4.16 - Porovnání životnosti topných těles ve vztahu k časové bází spínání [27].....	62
Obrázek 4.17 - Vliv časové báze spínání na interní teplotu topných těles [27] .....	62
Obrázek 4.18 - Princip spínání SSR při průchodu nulou a náhodným spínáním .....	63
Obrázek 4.19 - Zapojení optočlenu pro spínání SSR.....	63
Obrázek 4.20 - Zapojení rozhraní RS485 na měřicím modulu .....	64
Obrázek 4.21 - Katalogové zapojení step-down regulátoru MC34063 [32] .....	67
Obrázek 4.22 - Schéma zapojení zdrojové části měřicího modulu .....	68
Obrázek 4.23 - Princip filtrační tlumivky na vstupu měřicího modulu [33] .....	68
Obrázek 4.24 - Krabička Railbox pro měřicí modul.....	69
Obrázek 4.25 - Kvalifikovaný návrh na 2-stranné DPS podle [35] .....	70
Obrázek 4.26 - Průběh měření EMI měřicího modulu.....	70
Obrázek 5.1 - Hlavní smyčka programu .....	71
Obrázek 5.2 - Stavový automat a jeho funkce ve stavech pro čtení MCP4324 .....	72
Obrázek 5.3 - Čtecí a zápisový časový diagram [19].....	73
Obrázek 5.4 - Vzorkování periody vstupního signálu.....	74
Obrázek 5.5 - Stavový automat pro čtení kanálů v MCU a vývojový diagram funkce stavů .....	75
Obrázek 5.6 - Stavový diagram Modbus RTU.....	77
Obrázek 5.7 - Postup zpracování Modbus požadavku [6] .....	79
Obrázek 5.8 - Vývojový diagram funkce řízení výstupů pro SSR.....	82
Obrázek 6.1 - Zapojení silové části.....	84
Obrázek 6.2 - Zapojení modulů SSR .....	85
Obrázek 6.3 - Zapojení měřicího modulu .....	86

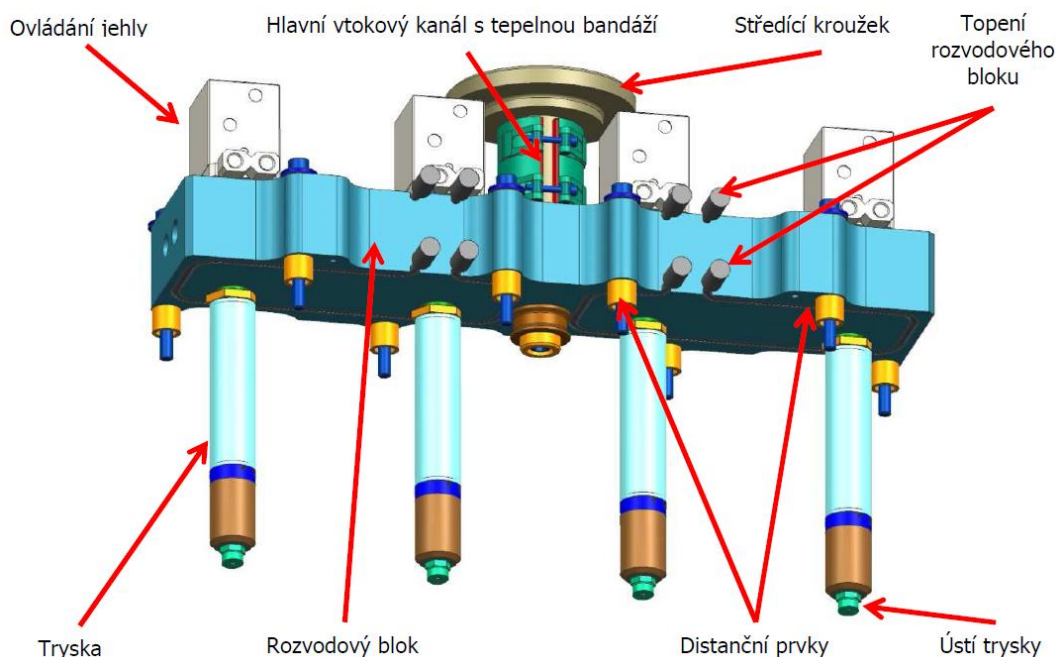
Obrázek 7.1 - Hlavní obrazovka zobrazující teploty zón.....	89
Obrázek 7.2 - Obrazovka pro ukládání receptur a rychlou volbu. ....	90
Obrázek 7.3 - Nastavení náběhového profilu regulátorů .....	91
Obrázek 8.1 - Graf měření linearity teploty .....	92
Obrázek 8.2 - Graf rozdílu hodnot simulované teploty a změřené .....	93
Obrázek 8.3 - Napětí měřené multimetrem a měřícím modulem.....	94
Obrázek 8.4 - Rozdíl napětí mezi multimetrem a měřícím modulem .....	94
Obrázek 8.5 - Náběh teploty a začátek kmitání soustavy .....	95
Obrázek 8.6 - Detail ustálených kmitů soustavy. ....	96
Obrázek 8.7 - Průběh regulace při skokové změně žádané hodnoty .....	96
Obrázek 8.8 - Detail regulačního překmitu. ....	97
Obrázek 8.9 - Detail regulačního překmitu.....	97

# Seznam tabulek

Tabulka 1 - Příklad kódování dat v protokolu EUROMAP17 .....	19
Tabulka 2 - Formát datové zprávy pro požadavek čtení EUROMAP17.....	20
Tabulka 3 - Formát datové zprávy pro odpověď požadavku čtení EUROMAP17 .....	20
Tabulka 4 - Formát datové zprávy pro požadavek zápisu EUROMAP17 .....	21
Tabulka 5 - Seznam nepoužívanější sběrnic [5] .....	23
Tabulka 6 - Seznam možných chybových kódů protokolu Modbus [6] .....	25
Tabulka 7 - Definice funkčních kódů protokolu Modbus [6] .....	26
Tabulka 8 - Maximální délky vedení pro rozhraní RS485 .....	27
Tabulka 9 - Nastavení PID parametrů z kritického zesílení a kritické period ZN metodou [11]	39
Tabulka 10 - Určení poměru časových konstant $\tau_2$ [16].....	45
Tabulka 11 - Parametry proudových transformátorů řady JCXXF-XXXmA [24] .....	57
Tabulka 12 - Proudová rozvaha odběru součástek na desce .....	65
Tabulka 13 - Požadavek funkce 0x05 .....	80
Tabulka 14 - Odpověď funkce 0x05 .....	80
Tabulka 15 - Chyba funkce 0x05 .....	80
Tabulka 16 - Požadavek funkce 0x04 .....	81
Tabulka 17 - Odpověď funkce 0x04 .....	81
Tabulka 18 - Chyba funkce 0x04 .....	81
Tabulka 19 - Požadavek funkce 0x10 .....	81
Tabulka 20 - Odpověď funkce 0x10 .....	81
Tabulka 21 - Chyba funkce 0x10 .....	81
Tabulka 22 - Koeficienty polynomicke aproximace termočlánků [37] .....	88

# 1 ÚVOD

Technologie vstřikování je jedna z nejpoužívanějších metod výroby plastových součástí. Používá se pro širokou škálu výrobků téměř ve všech odvětvích průmyslu. Plastový dílec je vyroben za pomoci vstřikovacího stroje, vstřikovací formy a definované technologie. Technologie výroby je ve velké míře daná vstřikovací formou a druhem vtokové soustavy. Vtoková soustava patří k nejdůležitějším faktorům ovlivňující proces vstřikování a výsledné vlastnosti plastového dílce. Pro vstřikovací formy plastu se používají studené a horké vtokové soustavy. Studené vtokové systémy mají velké nevýhody, jako jsou vysoká zmetkovitost, nutnost manuálních víceprací, nízká kvalita vzhledu produktu a požadavky na vysoký vstřikovací tlak. Z tohoto důvodu konstruktéři preferují použití horkých vtokových systémů. Horká vtoková soustava udržuje plast ve vtokové soustavě stále ve stavu taveniny, zlepšuje kvalitu výsledných plastových dílců a snižuje čas cyklu. Udržování taveniny při konstantní teplotě ve vtokových kanálcích poskytuje stejnou viskozitu po celou dobu toku a lepší kontrolu vstřikovacího tlaku.



**Obrázek 1.1 - Řez horkým vtokem [1]**

Horké vtokové systémy však požadují zařízení na ovládání teploty, k čemuž se používají různé typy automaticky řízených ohřivačů. Výrobci vtokových soustav nejčastěji používají pro měření teploty zón termočláanky typu J, v omezené míře taky termočláanky typu K.

Tato diplomová práce je zaměřena na vývoj regulátoru ohřevu vtokové soustavy pro vstřikovací formy s maximálním počtem 56 regulovaných zón.

## 2 REŠERŠE POUŽÍVANÝCH METOD REGULACE HORKÝCH VTOKŮ

Moderní vstřikovací lisy většinou již disponují možností regulace teploty horkých vtoků, přičemž počet zón pro regulaci horkých vtoků je volitelný parametr při specifikaci a objednávce stroje. Nastavování teplot včetně receptur pro formy jsou pak implementovány do vizualizačního panelu stroje a elektrická výzbroj lisu je rozšířena o komponenty pro regulaci teploty vtoků.

Na druhou stranu starší vstřikovací lisy danými možnostmi nedisponují a regulace horkých vtoků je ponechána na starost provozovateli stroje. Někteří výrobci vstřikovacích lisů mají alespoň zabudován komunikační protokol EUROMAP 17 [2], který slouží ke komunikaci s externími jednotkami, mezi které patří i regulátor horkých vtoků. Tento protokol umožňuje vzdálené ovládání externí jednotky z operačního panelu stroje.

V současné době se problematikou regulátorů horkých vtoků zabývá více firem. Přístupy k dané problematice jsou různé. Nejčastější řešení je použití klasických regulátorů teploty. Tyto jednotlivé regulátory jsou zabudovány do rozvaděčů současně s jisticími a výkonovými prvky. Tento způsob řešení je použitelný pro menší počet zón. Nejpoužívanější počet zón je 1-16. Toto řešení má zásadní nevýhodu, a to že nastavení teploty pro každou zónu se musí provádět ručně na každém regulátoru zvlášť. Většinou nedisponují možností komunikace s nadřazeným systémem, není možno uchovávat nastavení teplot pro různé formy a při každé změně výroby je nutnost nového přestavení regulátorů. Výhodou tohoto řešení je nižší cena.



Obrázek 2.1 - Řešení pomocí standardních regulátorů teploty [3]

Dalším přístupem k řešení dané problematiky jsou sofistikované regulátory osazeny výpočtovou technikou, která umožňuje implementovat množství funkcí. Jedná se hlavně o možnosti diagnostiky různých procesních stavů, použití náběhového teplotního profilu, komunikace s nadřazenými systémy a uchování receptur. Toto řešení se používá pro větší počty regulovaných zón a je hlavně doménou velkých firem působících v oblasti vývoje a výroby horkých vtoků. Nevýhodou je vyšší pořizovací cena.



**Obrázek 2.2 - Řešení regulátorů s pokročilými funkcemi [4]**

Nejznámější výrobci horkých vtoků a regulátorů:

ORYCON EU, GÜNTHER, SYNVENTIVE, HASCO, MÄNNER, HUSKY, MOLD MASTERS, INCOE, THERMOPLAY, HEITEC, HRS.

### 3 NÁVRH KONCEPCE ZAŘÍZENÍ

Při návrhu koncepce zařízení je možnost vybrat si ze dvou základních postupů. Buď vyvíjené zařízení sestavit z již existujících a na trhu dostupných modulů, nebo provést kompletní návrh elektronických modulů. První ze zmíněných postupů má hlavní výhodu v jednodušší hardwarové realizaci, ale jen za předpokladu, že jsou na trhu dostupné vhodné moduly s potřebnými funkcemi. Druhý způsob oproti prvnímu umožňuje vytvořit zařízení přesně dle daných požadavků a ve většině případů dosáhnout kompaktnějších rozměrů výsledného přístroje a nižší finanční náročnosti.

Vznesený požadavek specifikuje zařízení, které bude mít možnost modulárního rozšiřování počtu zón v provedení s montáží na DIN-lištu a schopné komunikovat s nadřazeným systémem protokolem EUROMAP 17 [2]. Bude použita vizualizace s dotykovým panelem a budou implementovány možnosti diagnostiky. Z důvodu, že většina horkých vtoků má vyvedeny termočlánky a topná tělesa na 16-ti pinové konektory HARTING po osmi zónách, je požadováno, aby jeden modul byl schopen změřit osm termočlánků a řídit výkon osmi topných těles. Pro řízení výkonu topných těles budou použity triakové spínací moduly SSR. Zařízení musí být finančně nenáročné.



Obrázek 3.1 - Konektory horkých vtoků na vstřikovací formě



### 3.1 Použití hotových modulů

Při použití hotových modulů je nutné, aby moduly splnily všechny požadované funkce. Nepovedlo se najít žádného výrobce elektronických modulů, který by dokázal změřit osm analogových termočlánekových vstupů a obsahoval i osm výstupů pro řízení SSR.

Dále se nabízí použití vstupně výstupních karet PLC. Tu opět vzniká problém najít kombinované moduly. Museli by se použít samostatně vstupní analogové moduly a výstupní moduly. Navíc při použití PLC modulů je potřeba použít i CPU. Tím se dané řešení začíná prodražovat.

Vzhledem k výše uvedeným důvodům není možno využít již existující moduly k sestavení zařízení dle definovaných požadavků.

### 3.2 Návrh vlastního zařízení

Jak již vyplývá z předchozí kapitoly, při návrhu zařízení se použijí vlastní měřicí moduly. Je nutné, aby navrhované zařízení obsahovalo všechny prvky, které bude následně potřebovat ke svému provozu.

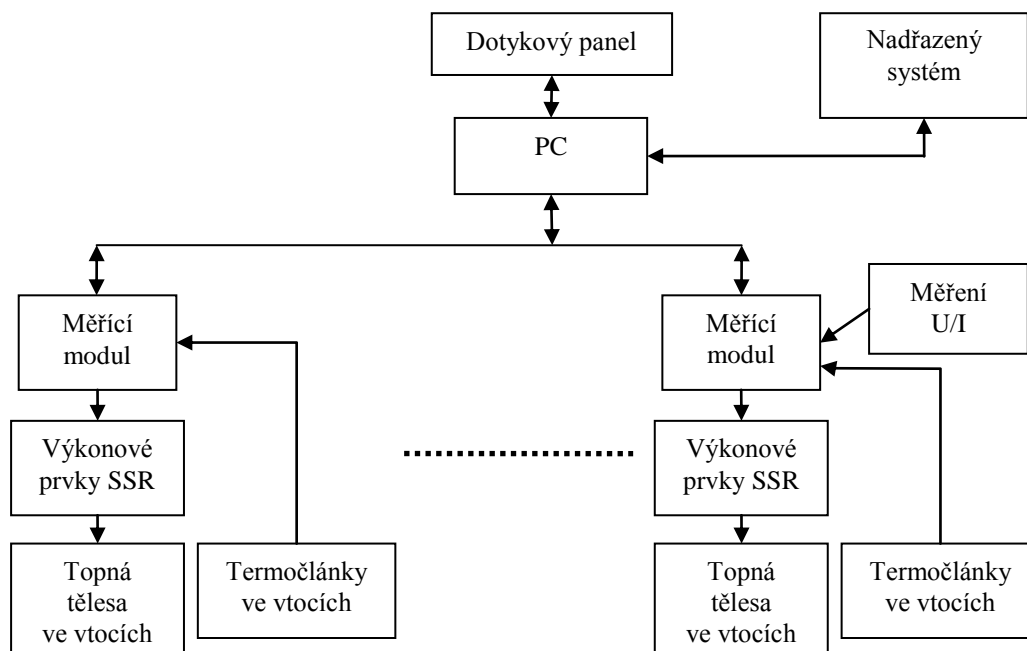
Především to jsou:

- pultový rozvaděč s konektory pro připojení topných těles a termočláneků,
- mini počítač, nejlépe bez pohyblivých součástí,
- dotykový panel pro vizualizaci a zadávání hodnot,
- maják pro signalizaci stavu zařízení,
- výkonové a jistící prvky,
- převodník pro komunikaci po sběrnici USB-RS 485,
- měřicí moduly.

Dotykový panel s uživatelským rozhraním bude zprostředkovávat ovládání zařízení obsluhou. V PC bude spuštěna aplikace, která bude zajišťovat komunikaci s nadřazeným systémem, s měřicími moduly a bude provádět veškeré zpracování naměřených dat. Měřicí moduly budou zajišťovat pouze sběr dat a řízení výkonových prvků. Stav zařízení bude kromě vizualizace signalizovat i světelný maják.

Na Obrázek 3.2 je blokové schéma navrhovaného zařízení, ze kterého je patrné, že je potřeba vyřešit následující problémy:

- komunikaci mezi PC a nadřazeným systémem,
- komunikaci mezi PC a měřicími moduly,
- měření termočláneků a jejich linearizaci,
- měření elektrického proudu a napětí potřebné pro diagnostiku elektrických těles,
- řízení výkonových prvků SSR,
- regulaci teploty.



**Obrázek 3.2 - Blokové schéma návrhu zařízení**

V následujících odstavcích se na základě výše definovaných problémů provede výběr komunikačních sběrnic, a teoretický rozbor daných problematik, ze kterých bude vybráno nejvhodnější řešení pro dané zařízení.

### 3.3 Komunikace mezi PC a nadřazeným systémem

Jak vyplývá ze zadání, je potřeba, aby výsledné zařízení komunikovalo s nadřazeným systémem pomocí protokolu EUROMAP 17 [2]. Tento protokol je určen ke komunikaci mezi vstřikovacím lisem a jednotkami jako jsou regulátory horkých vtoků, temperační jednotky, chladicí jednotky, sušárny materiálu, doprava materiálu, vážicí systémy a kolorovací systémy.

EUROMAP 17 je jeden z mnoha protokolů, které definuje organizace EUROMAP. Organizace EUROMAP byla založena v roce 1964, reprezentuje zhruba 1000 firem vyrábějících zařízení a stroje pro plastikářský a gumárenský průmysl.

Základní specifikace přenosu:

- fyzická vrstva RS485,
- přenosové rychlosti 1200, 2400, 4800, 9600 Baud,
- datový formát: 8 bit ASCII, 1-start bit, 1-paritní bit, 1-stop bit,
- typ komunikace Master/Slave, kde master je počítač vstřikovacího stroje a slave je periferní jednotka.

Protokol definuje nezbytné procedury pro navázání spojení, výměnu dat a ukončení přenosu. Zprávy jsou složeny z ASCII znaků doplněny o řídicí znaky.

Jsou definovány dvě kategorie zpráv:

- Čtení z periferní jednotky – R.
- Zápis do periferní jednotky – W.

Zdali se jedná o zápis nebo čtení je dáno kódem požadované funkce C1 a C2.

Při přenosu se používají následující řídicí znaky:

- STX – start of text
- ETX – end of text
- EOT – end of transmission
- ENQ – enquiry
- ACK – positiv acknowledge
- NAK - negativ acknowledge
- ETB – end of text block
- DLE – data link escape

Datový formát pro přenášené hodnoty parametrů je pevný, a používá osm ASCII znaků, pomocí kterých je zakódována jedna číselná hodnota viz Tabulka 1.

Hodnota příklad	D1	D2	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8
+5.3	5	.	3	0	0	0	0	0	0
	0	5	.	3	0	0	0	0	0
	0	0	0	5	.	3	0	0	0
-5.3	5	-	3	0	0	0	0	0	0
	0	5	-	3	0	0	0	0	0
	0	0	5	-	0	0	0	0	0
1500	0	0	0	0	0	1	5	0	0
-1500	0	0	0	0	1	5	0	0	-

**Tabulka 1 - Příklad kódování dat v protokolu EUROMAP17**

Při kódování čísla není povolena žádná mezera. Při kladném desetinném čísle se používá desetinná tečka, při záporném desetinném čísle se používá znaménko mínus, které zároveň zastupuje i desetinnou tečku. V případě celého čísla je kladné číslo zarovnáno od krajního znaku D8 a při celém záporném čísle je znaménko mínus použito na pozici D8 a číslo je zarovnáno od pozice D7.

### 3.3.1 Čtení parametrů z periferní jednotky.

Slouží na čtení parametrů z adresované periferní jednotky, ze které se může v jednom dotazu číst jeden až šestnáct kanálů specifikovaných v dotazu.

Každá zpráva začíná i končí řídicím znakem. Mezi řídicími znaky jsou umístěny adresa jednotky, adresy čtených kanálů, kód funkce, a příslušné data.

Formát dotazu je následovný:

EOT	STX	ADD1	ADD2	N1	N2	N3	N4	C1	C2	ENQ	ETX	BCC
-----	-----	------	------	----	----	----	----	----	----	-----	-----	-----

**Tabulka 2 - Formát datové zprávy pro požadavek čtení EUROMAP17**

EOT - resetuje všechny zařízení na lince

STX - oznamuje začátek textového přenosu

ADD1 a ADD2 - Adresování periferie je pomocí ASCII znaků o délce dva bajty.

Rozsah adres je tím pádem 00-99.

N1 a N2 - číslo prvního čteného kanálu je pomocí ASCII znaků o délce dva bajty.

N3 a N4 - číslo posledního čteného kanálu je pomocí ASCII znaků o délce dva bajty.

Při čtení jednoho kanálu se používá stejná adresa prvního a posledního kanálu, při čtení více kanálů je povoleno čtení maximálně 16 kanálů.

C1 a C2 - kód čteného parametru je pomocí ASCII znaků o délce dva bajty. Seznam kódů pro konkrétní typ koncového zařízení je uveden v tabulce kódů [2].

ENQ a ETX - jsou kontrolní znaky pro požadavek a ukončení textového přenosu.

BCC - je kontrolní znak, který vznikne provedením operace exkluzive OR, přes všechny příchozí znaky vyjma znaku STX.

Odpověď na daný požadavek čtení.

Možné odpovědi na požadavek mastra jsou:

- Jednotka odpovídá mastrovi stejnou hodnotou bajtu ADD1, ADD2, N1, N2, N3, N4, C1 a C2 jaká byla v požadavku následovaných takovým počtem osmic ASCII znaků D1-D8, kolik číselných hodnot jednotka odesílá. Přenos je opět ukončen řídicím znakem ETX a kontrolním znakem viz tabulka 3.

EOT	STX	ADD1	ADD2	N1	N2	N3	N4	C1	C2
D1..D8	D1..D8	D1..D8	D1..D8	D1..D8	D1..D8	ETX	BCC		

**Tabulka 3 - Formát datové zprávy pro odpověď požadavku čtení EUROMAP17**

- Negativní odpověď řídicím znakem NAK je odeslána v případě, že přijatý řetězec je v pořádku včetně kontrolního znaku BCC, ale datový obsah je nekorektní.

- c) Řídícím znakem ENQ slave odpovídá v případě, že požadavek je v pořádku, ale jednotka není momentálně schopna data poskytnout. Master musí požadavek zopakovat.
- d) V případě nefunkčního spojení, špatné parity nebo nesprávné hodnoty kontrolního znaku BCC, slave nedá odpověď a master může následně po uplynutí času 400ms poslat požadavek znovu, nicméně maximálně tři krát po sobě.

### 3.3.2 Zápis parametrů do externí jednotky

Při zápisu parametrů do externí jednotky posílá master následující řetězec.

EOT	STX	ADD1	ADD2	N1	N2	N3	N4	C1	C2
D1..D8	D1..D8	D1..D8	D1..D8	D1..D8	D1..D8	ETX	BCC		

**Tabulka 4 - Formát datové zprávy pro požadavek zápisu EUROMAP17**

EOT - resetuje všechny zařízení na lince

STX - oznamuje začátek textového přenosu

ADD1 a ADD2 - Adresování periferie je pomocí ASCII znaků o délce dva bajty.

Rozsah adres je tím pádem 00-99.

N1 a N2 - číslo prvního zapisovaného kanálu je pomocí ASCII znaků o délce dva bajty.

N3 a N4 - číslo posledního zapisovaného kanálu je pomocí ASCII znaků o délce dva bajty.

Při zapisování jednoho kanálu se používá stejná adresa prvního a posledního kanálu, při zapisování více kanálů je povolen zápis maximálně do 16 kanálů.

C1 a C2 - kód zapisovaného parametru je pomocí ASCII znaků o délce dva bajty.

Seznam kódů pro konkrétní typ koncového zařízení je uveden v tabulce kódů [2].

Odpověď na daný požadavek zápisu.

Možné odpovědi na požadavek zápisu mastra jsou:

- a) Pozitivní odpověď řídicím ACK značí, že požadavek zápisu byl korektně přijat a zpracován.
- b) Negativní odpověď řídicím znakem NAK je odeslána v případě, že přijatý řetězec je v pořádku včetně kontrolního znaku BCC, ale datový obsah je nekorektní.
- c) Řídícím znakem ENQ slave odpovídá v případě, že požadavek je v pořádku, ale jednotka není momentálně schopna data poskytnout. Master musí požadavek zopakovat.

- d) V případě nefunkčního spojení, špatné parity nebo zlou hodnotu kontrolního znaku BCC slave nic neodpoví a master může po uplynutí času 400ms poslat požadavek znovu, ale maximálně tři krát po sobě.

N1	N2	N3	N4	C1	C2	
0	1	1	6	S	A	first setpoint of temperature for 16 chanel
1	7	3	2	H	P	heating proportional band for 16 chanel
0	0	0	0	H	I	heating integral time for a single chanel
0	6	0	9	S	W	status word for 4 chanel
0	3	0	7	M	W	mode word for 5 chanel

Obrázek 3.3 - Příklad adresování kanálů s příkazy EUROMAP17 [2]

Na Obrázek 3.3 je příklad adresace kanálů v slave jednotce, včetně příkazů pro dané kanály.

### 3.4 Komunikace mezi PC a měřícími moduly

Z důvodu požadované modularity navrhovaného zařízení je potřeba vyřešit komunikaci mezi PC a měřícími moduly. Protože se jedná o průmyslové zařízení, bude vybrána komunikační sběrnice, která je primárně určena k průmyslové komunikaci. Hlavní požadavky kladené na průmyslovou sběrnici jsou [5]:

- spolehlivost,
- odolnost proti rušení,
- rychlost,
- cena.

Nejpoužívanější sériové sběrnice jsou uvedeny v následující tabulce včetně jejich zařazení do kategorií. Rozdělení není striktní a u některých sběrnic se překrývá.

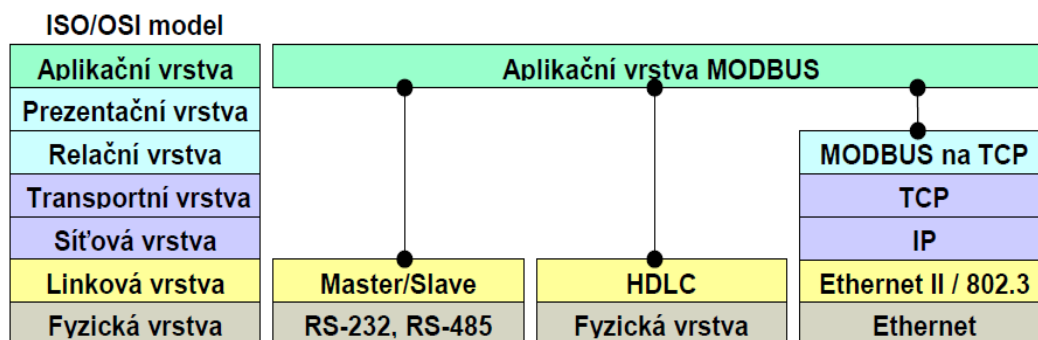
Sběrnice	SensorBus	DeviceBus	Fieldbus
Profibus	X	X	
P-Net		X	X
LonTalk		X	X
CAN		X	
DeviceNet		X	
CANopen		X	X
ControlNet		X	
Modbus		X	
Ethernet		X	X
Interbus		X	
HART	X	X	
AS-Interface	X	X	
IO-Link	X	X	
Profinet (Industrial Ethernet)	X	X	X

**Tabulka 5 - Seznam nejpoužívanější sběrnic [5]**

Hlavní kritéria použity pro výběr komunikační sběrnice pro měřicí modul:

- Dostupnost součástkové základny pro realizaci hardware měřicího modulu.
- Objem dat které se budou po sběrnici přenášet.
- Použitelnost v průmyslovém prostředí.
- Cena součástek potřebných pro realizaci.
- Fyzické rozhraní RS485 z důvodu sjednocení převodníků k PC (měřicí moduly + Euromap).

Pro komunikaci mezi měřicími moduly a řídicím PC se použije komunikační protokol Modbus [6]. Protokol Modbus byl vyvinut firmou Modicon, je velmi oblíben a široce používán díky jeho jednoduchosti a otevřenosti. Jeho specifikace, která je volně přístupná na internetu, definuje strukturu zpráv, která umožňuje navázat spojení typu Master/slave mezi inteligentními zařízeními. Modbus definuje pouze zprávy a proto je z principu nezávislý na použité fyzické vrstvě. V současné době je podporována celá řada komunikačních médií např. sériové linky typu RS-232, RS-422 a RS-485, optické a rádiové sítě, nebo síť Ethernet s využitím protokolu TCP/IP. Komunikace probíhá metodou požadavek-odpověď a požadovaná funkce je specifikována pomocí kódu funkce, jež je součástí požadavku. Modbus je komunikační protokol na úrovni aplikační vrstvy ISO/OSI modelu, umožňující komunikaci typu klient-server mezi zařízeními na různých typech sítí a sběrnic.



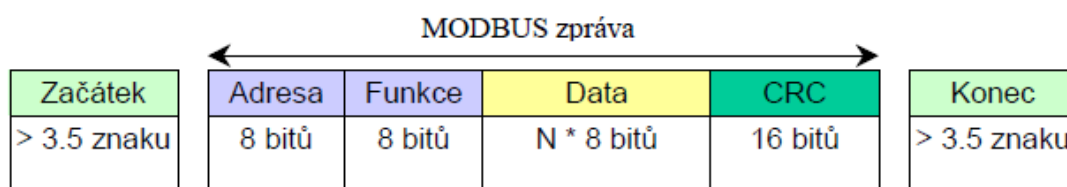
Obrázek 3.4 - Příklady implementace protokolu Modbus [6]

Protože se jedná o Master/Slave protokol, v jeden okamžik může být na sběrnici pouze jeden master a 1 až 247 slave jednotek. Komunikaci vždy zahajuje master, slave nesmí nikdy vysílat data bez pověření mastra. Master posílá požadavky slave jednotkám ve dvou režimech:

- unicast režim – master adresuje požadavek jedné konkrétní slave jednotce a ta pošle odpověď,
- broadcast režim – master posílá požadavek všem jednotkám, žádná jednotka neodpoví.

Modbus protokol definuje dva sériové vysílací režimy, Modbus RTU a Modbus ASCII. Režim určuje v jakém formátu jsou data vysílána a jak dekódována. Každá jednotka musí podporovat režim RTU, režim ASCII je nepovinný. Všechny jednotky na jedné sběrnici musejí pracovat ve stejném vysílacím režimu.

V měřicích modulech se použije pouze režim RTU. V režimu RTU obsahuje každý 8 bitový byte ve zprávě dva 4 bitové hexadecimální znaky. Vysílání zprávy musí být souvislé, mezery mezi znaky nesmějí být delší než 1.5 znaku. Začátek a konec zprávy je identifikován podle pomlky na sběrnici delší než 3.5 znaku.



Obrázek 3.5 - RTU rámeček zprávy [6]

Kód funkce udává serveru jaký druh operace má provést, kde rozsah kódů je 1 až 255, přičemž kódy 128 až 255 jsou vyhrazeny pro oznámení záporné odpovědi (chyby). Některé kódy funkcí mohou obsahovat i kód podfunkce upřesňující blíže požadovanou operaci. Obsah datové části zprávy poslané klientem slouží serveru k uskutečnění operace určené kódem funkce. Obsahem může být například adresa a počet vstupů, které má server přečíst, nebo hodnota registrů, které má server zapsat. U některých funkcí nejsou pro provedení operace zapotřebí další data a potom může datová část ve zprávě úplně chybět. V případě že při provádění požadované operace nedojde k chybě,



odpoví server zprávou, která v poli kód funkce obsahuje kód provedené funkce jako indikaci úspěšného vykonání požadavku. V datové části odpovědi předá server klientovi požadovaná data (pokud nějaká jsou). Pokud při vykonávání požadované operace dojde k chybě je v poli kód funkce vrácen kód požadované funkce s nastaveným nejvyšším bitem indikující neúspěch (kód funkce + 80h). V datové části je vrácen chybový kód upřesňující důvod neúspěchu viz Tabulka 6.

MODBUS chybové kódy		
Kód	Jméno	Význam
01	Ilegální funkce	Požadovaná funkce není serverem podporována
02	Ilegální adresa dat	Zadaná adresa je mimo serverem podporovaný rozsah
03	Ilegální hodnota dat	Předávaná data jsou neplatná
04	Selhání zařízení	Při provádění požadavku došlo k neodstranitelné chybě
05	Potvrzení	Kód určený k použití při programování. Server hlásí přijetí platného požadavku, ale jeho vykonání bude trvat delší dobu
06	Zařízení je zaneprázdněné	Kód určený k použití při programování. Server je zaneprázdněn vykonáváním dlouho trvajícího příkazu.
08	Chyba parity paměti	Kód určený k použití při práci se soubory. Server při pokusu přečíst soubor zjistil chybu parity
0A	Brána – přenosová cesta nedostupná	Kód určený k práci s bránou (gateway). Brána není schopná vyhradit interní přenosovou cestu od vstupního portu k výstupnímu. Pravděpodobně je přetížená nebo nesprávně nastavená.
0B	Brána – cílové zařízení neodpovídá	Kód určený k práci s bránou (gateway). Cílové zařízení neodpovídá, pravděpodobně není přítomno.

**Tabulka 6 - Seznam možných chybových kódů protokolu Modbus [6]**

MODBUS protokol definuje tři skupiny kódů funkcí.

Veřejné kódy funkcí:

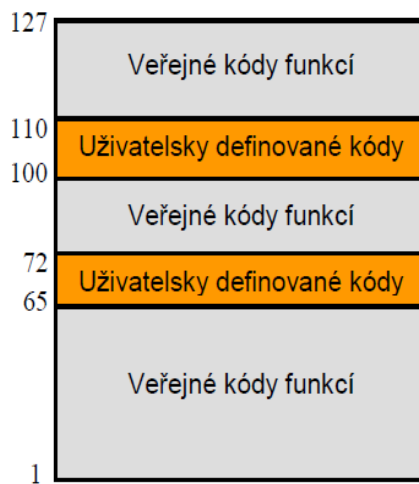
- jasně definované
- je garantovaná unikátnost
- veřejně zdokumentované
- schváleny společností MODBUS-IDA.org

Uživatelsky definované kódy funkcí:

- dva rozsahy uživatelsky definovaných funkcí (65 – 72 a 100 – 110)
- umožňují uživateli implementovat funkci, která není definovaná touto specifikací
- není garantována unikátnost

Rezervované kódy funkcí:

- kódy funkcí, které jsou v současnosti používány některými firmami a které nejsou dostupné pro veřejné použití



Obrázek 3.6 - Kategorie funkčních kódů protokolu Modbus [6]

				Kódy funkcí		
				Kód	Podfunkce	hex
Přístup k datům	Bitový přístup	Fyzické diskrétní vstupy	Čti diskrétní vstupy	02		02
		Interní bity nebo fyzické cívky	Čti cívky	01		01
			Zapiš jednu cívku	05		05
			Zapiš více cívek	15		0F
	16-bitový přístup	Fyzické vstupní registry	Čti vstupní registr	04		04
		Interní registry nebo fyzické výstupní registry	Čti uchovávací registry	03		03
			Zapiš jeden registr	06		06
			Zapiš více registrů	16		10
			Čti/zapiš více registrů	23		17
			Zapiš registr s maskováním	22		16
			Čti FIFO frontu	24		18
	Přístup k záznamům v souborech	Čti záznam ze souboru	20	6	14	
		Zapiš záznam do souboru	21	6	15	
	Diagnostika		Čti stav	07		07
		Diagnostika	08	00-18, 20	08	
		Čti čítač kom. událostí	11		0B	
		Čti záznam kom. událostí	12		0C	
		Sděl identifikaci	17		11	
		Čti identifikaci zařízení	43	14	2B	
Ostatní		Zapouzdřený přenos	43	13, 14	2B	
		CANOpen základní odkaz	43	13	2B	

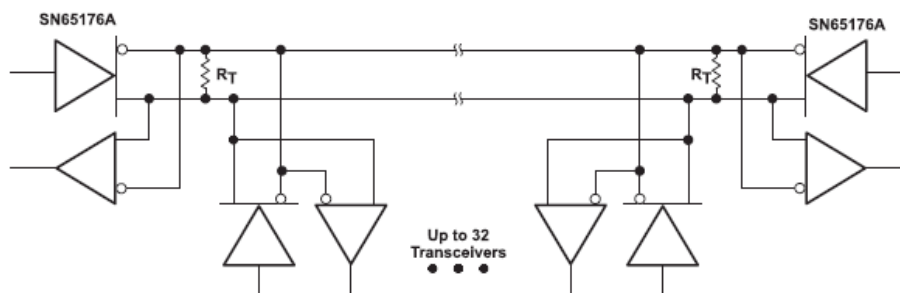
Tabulka 7 - Definice funkčních kódů protokolu Modbus [6]

### 3.5 Rozhraní RS-485

Ke komunikaci bude použito fyzické rozhraní RS485, které používá jak komunikační protokol EUROMAP 17, tak i komunikační protokol Modbus.

Standard RS485 je navržen tak, aby umožňoval vytvoření dvou vodičového polo-duplexního více prvkového spojení podle Obrázek 3.7. Má stejný základ jako široce rozšířený standard RS232, od kterého se liší hlavně jinou definicí napěťových úrovní, možností vytvářet sběrnice sestávající až z 32 zařízení a možností komunikace na vzdálenost do 1200 m. Výhodou je, že se linka RS485 dá vytvořit z RS23 pomocí

jednoduchých převodníků úrovně. Přenos je polo-duplexní a proto vyžaduje řízení směru přenosu dat. Stav aby v jednom okamžiku vysílalo jen jedno zařízení, musí zajistit komunikační protokol, který však není součástí standardu RS485. Nejjednodušší variantou komunikace je konfigurace s jedním trvale připnutým vysílačem a až 31 přijímači. V obvyklé topologii se zařízení ve vysílání střídají.



**Obrázek 3.7 - Zapojení komunikační sítě s rozhraním RS485**

Při komunikaci na vyšší vzdálenosti musí být vedení na obou stranách zakončeno terminátory (zakončovacími odpory  $R_T$ ), smyslem kterých je zabránit odrazům signálu od konců vedení a zároveň pomáhají zvýšit odolnost linky proti rušivým signálům. Terminátor používá hodnotu obrazové impedance  $120 \Omega$  a výsledná impedance linky je pak  $60 \Omega$  ( $120 \Omega \parallel 120 \Omega$ ).

I když rozhraní pracuje s rozdílovým napětím, tak při spojení na delší vzdálenosti se musí kromě signálových vodičů RxTx+ (A) a RxTx- (B) propojit i „země“ (GND) komunikujících zařízení. Příčinou je, že ve vzdálených místech mohou existovat značné rozdíly v potenciálu "země".

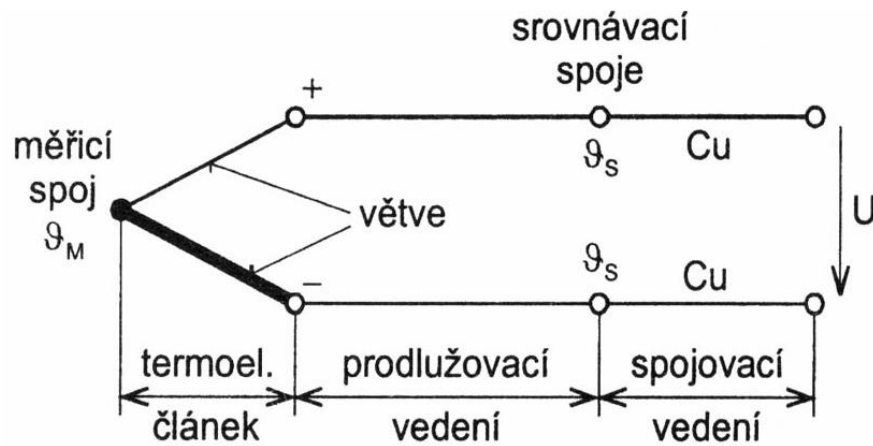
Komunikační rychlost [Bd]	Maximální délka vedení [m]
19 200	1200
38 400	600
57 600	300
115 200	150

**Tabulka 8 - Maximální délky vedení pro rozhraní RS485**

Protože měřicí moduly budou umístěny v rozvaděči, budou délky komunikačního vedení maximálně v jednotkách metrů. Z Tabulka 8 je vidět, že pro komunikaci po RS485 můžeme použít všechny komunikační rychlosti.

### 3.6 Princip měření teploty termoelektrickými snímači

Termoelektrické snímače teploty (termočlánky) jsou založeny na Seebeckovu termoelektrickém jevu, tj. na jevu převodu tepelné energie na elektrickou [7] [8]. Při různé teplotě konců vodiče se na každém konci objeví jiný potenciál napětí, míra tohoto jevu je určena Seebeckovým termoelektrickým součinitelem, který může mít hodnotu kladnou nebo zápornou. Základní zapojení termočlánku ze dvou vodičů zhotovených z různých materiálů s rozdílnými hodnotami termoelektrického součinitele je na obrázku 3.8. Měřicí spoj označen  $\vartheta_M$  - je teplota měřicího spoje, srovnávací spoj  $\vartheta_S$  - je teplota srovnávacího spoje.  $U$  - je termoelektrické napětí, používá se pro něj název elektromotorické napětí, je závislé na rozdílu teplot ( $\vartheta_M - \vartheta_S$ ).



Obrázek 3.8 - Schéma obvodu termoelektrického článku [7]

$$U = \alpha_{12}(\vartheta_M - \vartheta_S) \quad [V] \quad (3.1)$$

$U$  – termoelektrické napětí na termočlánku [V]

$\alpha_{12}$  – termoelektrický koeficient [V/°C] (závisí vždy na dvojici materiálů)

$\vartheta_M$  – teplota měřicího konce [°C]

$\vartheta_S$  – teplota srovnávacího konce [°C]

Bude-li se teplota měřit při jiné srovnávací teplotě  $\vartheta_S$ , než je teplota daná normou nebo než je vztažná teplota přístroje, je nutno výsledný údaj teploty  $\vartheta_M$  opravit.

K termočlánku lze z úsporných důvodů připojit prodlužovací vedení z materiálů levnějších než materiály, ze kterých je zhotoven vlastní termočlánek, které mají horší některé vlastnosti, např. menší chemickou odolnost. Tyto materiály musejí však mít stejné termoelektrické součinitele jako vlastní termočlánek. Prodlužovací vedení se někdy nevhodně nazývá kompenzační (nedochází v něm k žádné kompenzaci). Použije-li se k termočlánku či k prodlužovacímu vedení přívodní vedení např. z mědi, vzniknou

dva srovnávací spoje - na spojích měděného vedení s každým materiálem termočlánku. Termoelektrické napětí pro homogenní materiály závisí jen na teplotách konců vodičů, tedy spojů. To znamená, je-li do obvodu vložen další vodič z jiného materiálu, nemá v případě stejných teplot na svých koncích (spojích) žádný vliv na měřený údaj.

Teplota srovnávacího spoje tzv. vztažná teplota má významný vliv na napětí měřené na termočlánku a tím pádem i na přesnost měření. Aby naměřené napětí mohlo být spojeno s teplotou měřicího konce, je třeba znát teplotu srovnávacího konce termočlánku.

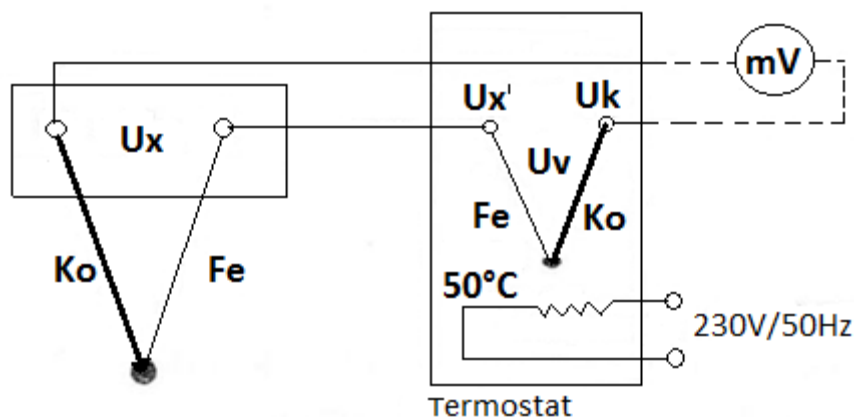
Jsou tři způsoby jak tento vliv podchytit. Při prvním způsobu je tato teplota udržována na stálé (známé) výši, např. v termostatu, případně ve směsi ledové tříště a vody, což je velmi přesný, ale nepříliš praktický způsob.

Dalším způsobem je použití kompenzačního zapojení, kdy napětí kompenzuje elektrický obvod, který je navržen tak, aby korigoval odchylku napětí způsobenou změnou teploty srovnávacího spoje. Lze použít kompenzačního můstku tzv. kompenzační krabice.

Posledním způsobem, užívaným např. u měřicích ústředí je číslicová korekce. Srovnávací spoje jsou vyvedeny na tzv. izotermickou svorkovnici, jejíž teplota je měřena odporovým nebo polovodičovým snímačem a korekci pak stanoví měřicí systém výpočtem.

### 3.6.1 Kompenzace studeného konce termostatem

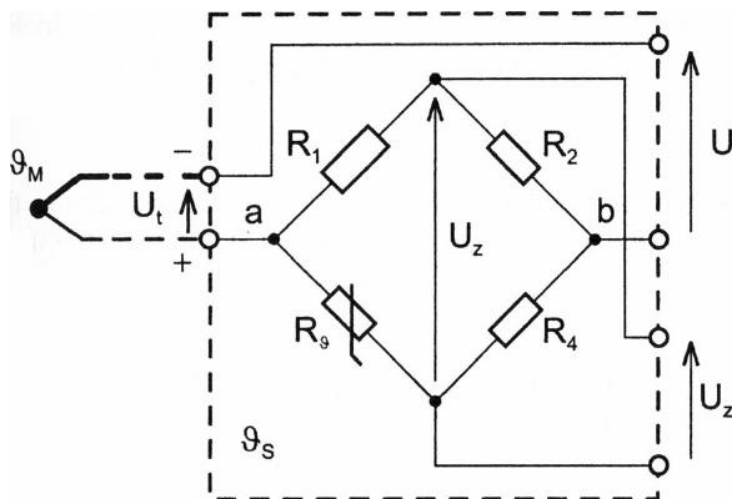
Aby nedocházelo ke kolísání teploty srovnávacího konce termočlánku (tzv. přídavná chyba měření), umístíme do termostatu pomocný termočlánek. Potom jsou termočlánky zapojeny proti sobě kvůli korekci. V případě průmyslových měření byl referenční termočlánek temperován na teplotě vyšší než teplota okolí - např. na 50°C.



Obrázek 3.9 - Zapojení termočlánku s použitím termostatu [7]

### 3.6.2 Kompenzace studeného konce kompenzační krabicí

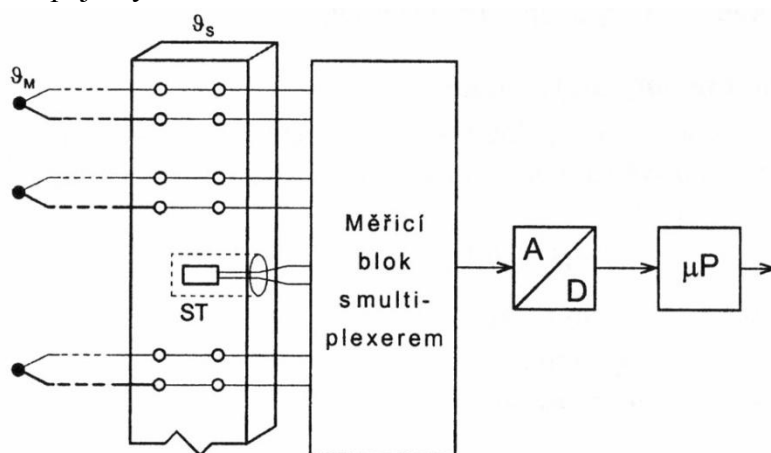
Kompenzační krabice obsahuje odporový můstek, který má v jednom rameni teplotně závislý prvek a je seřízen tak, že na výstupu vytváří kompenzační napětí stejné velikosti, jako je pokles napětí termočlánku způsobený zvýšením teploty srovnávacího konce.



Obrázek 3.10 - Zapojení termočlánku s použitím kompenzační krabice [7]

### 3.6.3 Kompenzace studeného konce izotermickou svorkovnicí

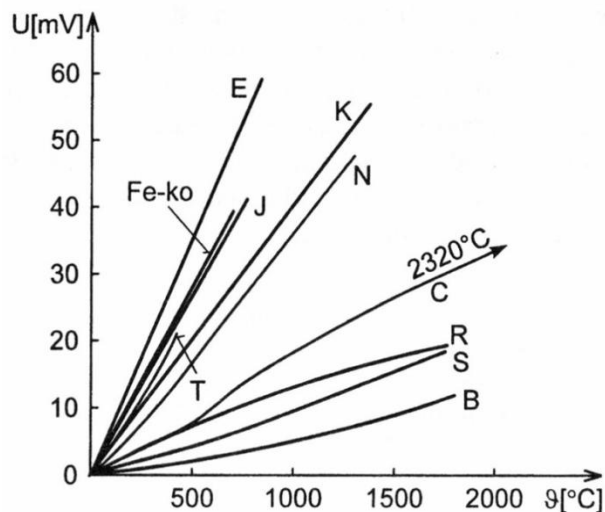
U číslicových měřicích systémů se nejčastěji používá izotermická svorkovnice. Teplota svorkovnice je snímána polovodičovým, nebo odporovým senzorem teploty ST. Při každém odměření všech měřicích míst se pak korekce na změny teploty srovnávacích spojů vyhodnotí číslicově.



Obrázek 3.11 - Zapojení termočlánku s použitím izotermické svorkovnice [7]

### 3.7 Linearizace termočlánků

Jak je vidět z Obrázek 3.12 nejsou charakteristiky termočlánků úplně lineární.

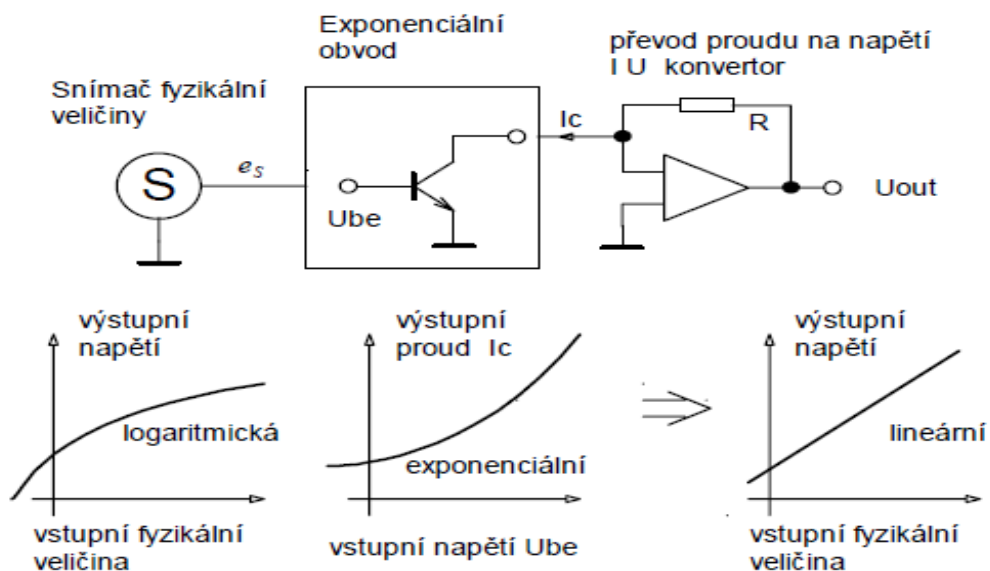


Obrázek 3.12 - Charakteristiky termočlánků [7]

Z tohoto důvodu je potřeba tyto charakteristiky linearizovat nějakou vhodnou metodou podle [9].

#### 3.7.1 Analogová linearizace

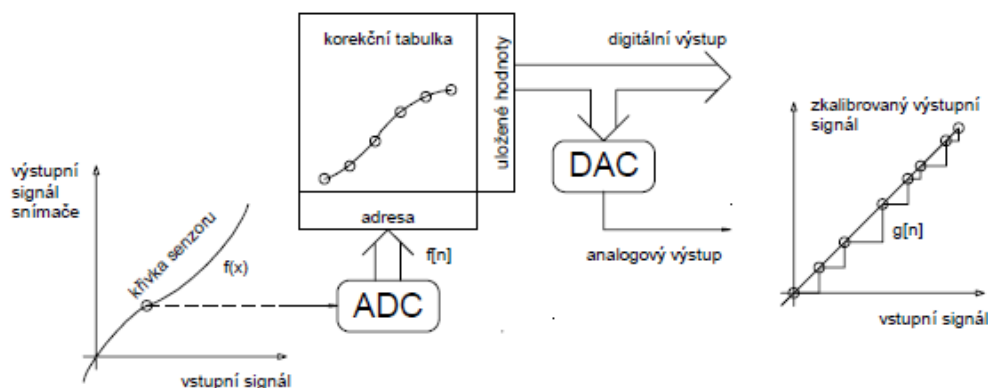
Nelineární vstup je přiveden na vstup elektronického obvodu s přesně inverzní charakteristikou.



Obrázek 3.13 - Analogová linearizace snímače [9]

### 3.7.2 Linearizace založená na korekční tabulce

Princip spočívá v uložení inverzní korekční tabulky v paměti mikroprocesoru, která odpovídá měřenému signálu senzoru. Digitální vstup AD převodníku představuje adresu paměťového místa s již korigovanou hodnotou.

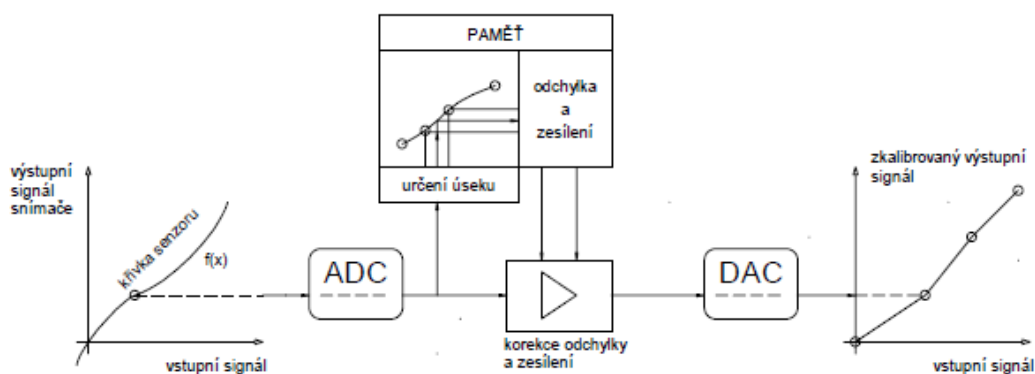


Obrázek 3.14 - Linearizace pomocí tabulky [9]

### 3.7.3 Linearizace založená na interpolaci

Úseková interpolace:

Charakteristika se rozdělí na úseky. Krajní body úseků odpovídají kalibrovaným bodům. Jednotlivé úseky jsou interpolovány přímkou popřípadě polynomem nebo splajnem jejichž koeficienty jsou uloženy do paměti. Výhodou tohoto řešení je, že nemusíme mít v paměti celou tabulku odpovídajících hodnot pro celý rozsah výstupu senzoru, ale stačí rozsah jednotlivých částí a k nim hodnoty koeficientů lineárních náhrad. Nevýhoda metody je taková, že pro velmi nelineární průběhy je třeba velký počet úseků.

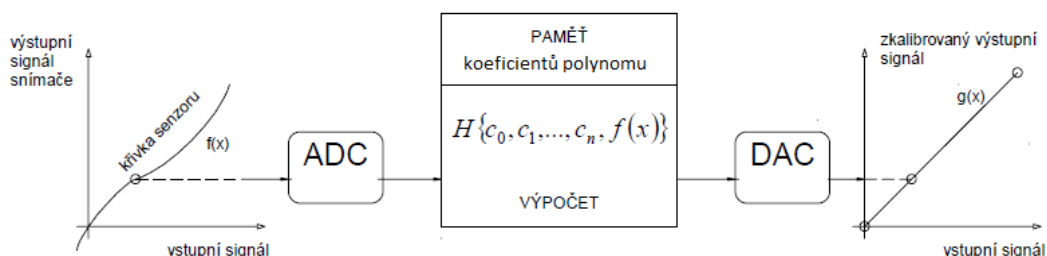


Obrázek 3.15 - Linearizace úsekovou interpolací [9]



Interpolační polynom:

Linearizace se provádí nalezením interpolačního polynomu k výstupní nelineární charakteristice senzoru. Výhodou metody je potřeba malé paměti jen na koeficienty polynomu a jeden korekční předpis pro celý rozsah měření, nevýhodou je výpočet, který potřebuje možnost práce v plovoucí řádové čárce.

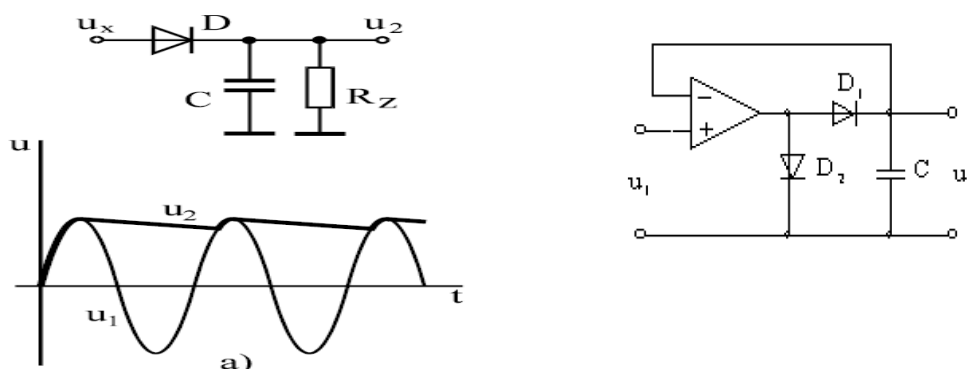


Obrázek 3.16 - Linearizace interpolačním polynomem [9]

### 3.8 Měření elektrického napětí a proudu

Jednou z dalších funkcí měřicího modulu bude měření efektivní hodnoty třífázového elektrického proudu, nebo napětí sloužící pro výpočet elektrických výkonů jednotlivých těles.

Problematika měření střídavých veličin je značně rozsáhlá a proto se uvedou jen dva způsoby měření efektivní hodnoty, které připadají v úvahu pro dané zařízení [10]. První způsob je použití AC/DC funkčního převodníku, předřazeného A/D převodníku, který transformuje střídavé napětí na stejnosměrné. Metody převodu AC/DC se dělí na přímé a nepřímé, podle toho, zda měří efektivní hodnotu přímo nebo nepřímo pomocí střední případně špičkové hodnoty, kterou následně převedou nebo přepočtou na hodnotu efektivní. Obvodové řešení převodníků využívajících mezipřevod na maximální (špičkovou) hodnotu patří mezi principiálně nejstarší. Vlastnosti všech pasivních detektorů nejsou dobré, především z důvodu nelinearity převodní charakteristiky a pro značnou citlivost na zkreslení měřeného signálu a šum. Pro přesné číslicové měření nejsou použitelné.



Obrázek 3.17 - Nepřímá metoda převodu AC/DC využívající špičkové hodnoty [10]

Na Obrázek 3.17 jsou dva typy špičkových detektorů pasivní a aktivní. Při obou detektorech vzniká na výstupu maximální hodnota střídavého napětí, která se po změření A/D převodníkem přepočte na efektivní hodnotu podle vztahu (3.2).

$$U_{ef} = \frac{U_{max}}{\sqrt{2}} \quad [V] \quad (3.2)$$

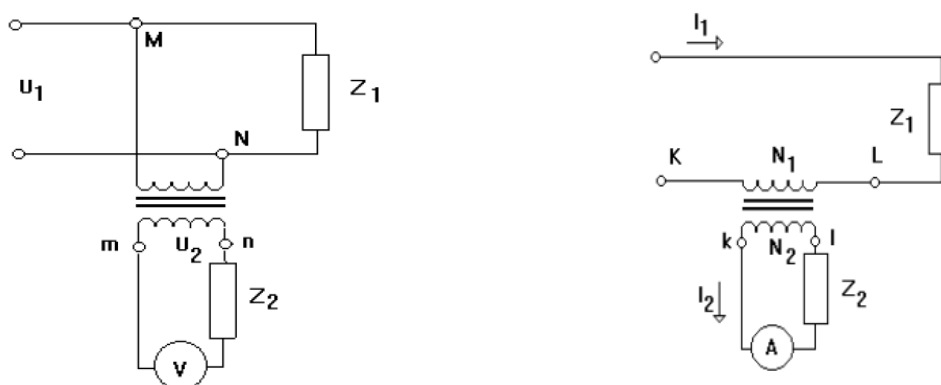
Podle Obrázek 3.17 je stejnosměrná složka výstupního napětí  $u_2$  přibližně rovna maximální hodnotě vstupního napětí  $u_x$ . Chybu způsobí vybíjení kondenzátoru přes zatěžovací rezistor  $R_Z$  a svodový odpor kondenzátoru  $R_C$ .

Druhý způsob měření je RMS, kdy se nepoužívá AC/DC funkční převodník na střední nebo maximální hodnotu, ale vstupní harmonický signál je přímo vzorkován A/D převodníkem a výpočet efektivní hodnoty se provádí diskretizovaným vzorcem (3.4) z definičního integrálu efektivní hodnoty (3.3).

$$U_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u_x^2 dt} \quad [V] \quad (3.3)$$

$$U_{ef} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N u_n^2} \quad [V] \quad (3.4)$$

Měřicí transformátory napětí (MTN) a měřicí transformátory proudu (MTP) se používají k převodu měřené veličiny na velikost vhodnou k měření a zároveň ke galvanickému oddělení měřicích obvodů od měřeného vysokého napětí. Zapojení obou typů transformátorů je na Obrázek 3.18.



Obrázek 3.18 - Zapojení MTN a MTP [10]

Primární vinutí MTN se připojuje do obvodu paralelně, na sekundární vinutí se připojuje měřicí obvod s vysokou impedancí, aby sekundární vinutí pracovalo blízko stavu naprázdno.

Transformační poměr pro idealizovaný stav je

$$P_U = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad [-] \quad (3.5)$$

kde:

$U_1$  – primární napětí [V]

$U_2$  – sekundární napětí [V]

$N_1$  – počet závitů primárního vinutí [-]

$N_2$  – počet závitů sekundárního vinutí [-]

Primární obvod MTP je zapojen do série se zdrojem, sekundární vinutí se uzavírá přes měřicí přístroj.

Transformační poměr ideálního měřicího transformátoru proudu je

$$P_I = \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad [-] \quad (3.6)$$

kde:

$I_1$  – primární proud [A]

$I_2$  – sekundární proud [A]

$N_1$  – počet primárních závitů [-]

$N_2$  – počet sekundárních závitů [-]

### 3.9 Regulace

Pro správnou funkci regulátorů horkých vtoků bude potřeba použít vhodný algoritmus pro regulaci teploty. Většina řídicích algoritmů používaných v průmyslových číslicových regulátorech má základ v diskrétní obdobě PID regulátoru. Jedná se o PSD regulátory snažící se napodobovat činnost spojitého PID regulátoru a jsou zpravidla realizovány jako program výpočtového systému [11] [12].

Algoritmus PSD regulátoru vychází přímo ze spojitého PID regulátoru, jen se provede náhrada integrálu sumací a náhrada derivace diferencí. Vztah pro výpočet akčního zásahu PSD regulátoru vypadá následovně

$$u_{(k)} = K \left( e_{(k)} + \frac{T}{T_I} \sum_{i=1}^k e_{(i)} + \frac{T_D}{T} (e_{(k)} - e_{(k-1)}) \right) \quad (3.7)$$

kde:

$K$  - proporcionální zesílení [-]

$u_{(k)}$  – akční zásah v kroku  $k$  [-]

$e_{(k)}$  – regulační odchylka v kroku  $k$  [-]

$T_I$  - integrační konstanta [s]

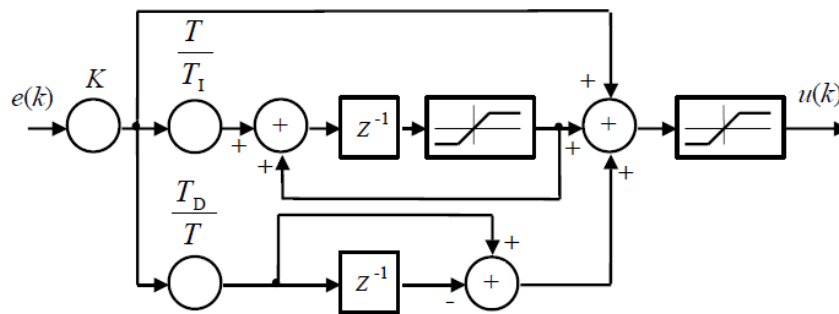
$T_D$  -derivační konstanta [s]

$T$  - perioda vzorkování [s]

Vztah (3.7) se označuje jako paralelní nebo polohový tvar PSD regulátoru a dá se převést na diskretní přenosovou funkci PSD regulátoru

$$F_{R(z)} = K \left( 1 + \frac{T}{T_I} \frac{z^{-1}}{(1-z^{-1})} + \frac{T_D}{T} (1 - z^{-1}) \right) \quad (3.8)$$

Struktura PSD regulátoru je znázorněna na následujícím Obrázek 3.19.



Obrázek 3.19 - Struktura PSD regulátoru [11]

V Obrázek 3.19 jsou dvě nelinearity typu nasycení, které vyjadřují omezení sumační složky a omezení celkového akčního zásahu v reálných regulátorech.

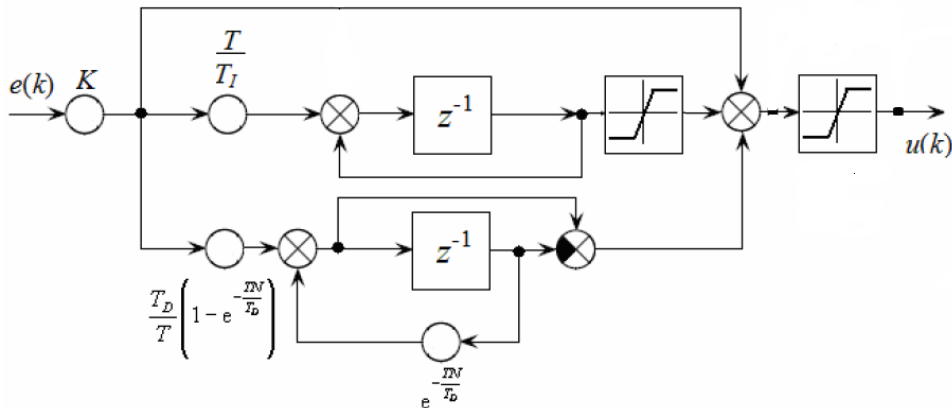
U diskretních řídicích algoritmů je potřeba počítat i s periodou vzorkování  $T$ . Volba periody vzorkování je poměrně složitý problém, který je třeba řešit individuálně pro každý regulační obvod. Vzhledem k rychlému vyregulování poruchy a k minimálnímu zhoršení stability procesem vzorkování a tvarování je vhodné volit periodu vzorkování co nejkratší a tak se maximálně přiblížit spojitým regulátorům. Na druhou stranu příliš krátká perioda vzorkování může způsobovat zesilování šumu a kmitání akčního zásahu.

Výše popsany PSD regulátor má nevýhodu v realizaci derivační složky nefiltrovanou první diferencí. Při krátkých periodách vzorkování může být neúnosně zesilován šum, což může způsobovat kmitání akčního zásahu, dokonce i nestabilitu celého obvodu a v průmyslové praxi je nepoužitelná. Od správně navržené diskretní diferenční složky se očekává co nejlepší shoda přechodové charakteristiky diskretního členu se spojitým členem. Přechodová charakteristika by měla mít maximum v kroku  $k=0$  a dále by měla exponenciálně klesat.

Porovnáním různých diskrétních náhrad v [13] vykazuje nejlepší vlastnosti pro náhradu derivační složky spojitého regulátoru náhrada podle (3.9). Takto odvozená realizace má nejlepší vlastnosti z hlediska univerzálnosti použití pro velký rozsah vzorkovacích period a z hlediska filtrování šumu. Pro zlepšení vlastností derivační složky regulátoru se provádí její filtrace úpravou řídicího algoritmu podle [13], čím se zajistí, že frekvence vyšší, než je určitá mezní frekvence, se nebudou derivační složkou dále zesilovat.

$$F_D(z) = \frac{T_D}{T} \left( 1 - e^{-\frac{NT}{T_D}} \right) \frac{1-z^{-1}}{1-e^{-\frac{NT}{T_D}} z^{-1}} \quad (3.9)$$

$$F_R(z) = K \left( 1 + \frac{T}{T_I} \frac{z^{-1}}{(1-z^{-1})} + \frac{T_D}{T} \left( 1 - e^{-\frac{NT}{T_D}} \right) \frac{1-z^{-1}}{1-e^{-\frac{NT}{T_D}} z^{-1}} \right) \quad (3.10)$$



Obrázek 3.20 - Struktura PSD s filtrací D-složky a s anti-windupem z rovnice (3.10)

Řídicí algoritmy, tak jak jsou popsány v předchozích odstavcích, jsou funkční, ale pro průmyslové použití je třeba doplnit minimálně omezení přebuzení integrační složky (anti-windup). V reálném světě neexistuje akční člen, který by byl schopen dodávat nekonečně velký akční zásah do soustavy. Akční zásah je vždy omezený. Je-li výstup integrační složky regulátoru větší než maximální možný akční zásah, nastává jev zvaný přebuzení integrační složky, který je také nazýván windup. Tento jev způsobuje zhoršení kvality regulace a vážné zpomalení regulačního děje. V případě, že není integrační složka nijak omezena, může hodnota na integrátoru dosáhnout mnohem vyšší hodnoty, než je maximální možný akční zásah. Při změně znaménka regulační odchylky  $e(k)$  může trvat určitou dobu, než se „odintegruje“ přebytečná část integrační složky a po tuto dobu se výstup regulátoru bude měnit velmi málo, což způsobí zpomalení regulačního děje.

Anti-windup lze u diskretních regulátorů realizovat dvěma základními způsoby:

- Statický anti-windup, kdy se pouze omezí výstup sumační složky pomocí nelinearity typu nasycení.
- Dynamický anti-windup, kdy se bere rozdíl signálů na vstupu akčního členu a na výstupu akčního členu. Tento signál se pak zavádí před sumátor, kde se omezuje integrace

### 3.10 Automatické nastavování parametrů regulátorů

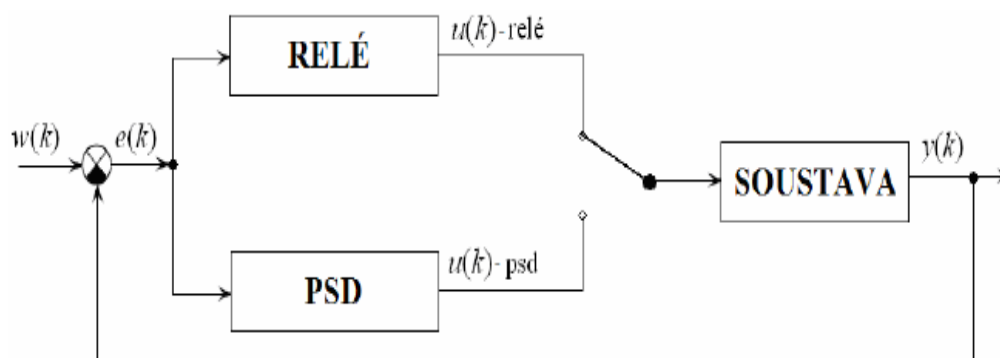
Pod pojmem automatické nastavování parametrů regulátoru se rozumí přizpůsobování parametrů regulátoru  $K$ ,  $T_I$ ,  $T_D$  na regulovanou soustavu tak, aby regulační děj byl co možná nejlepší vzhledem k požadovaným vlastnostem.

Metody pro automatické nastavování PID regulátorů jsou odvozeny z metod pro adaptivní regulaci. Tedy regulaci, kdy se regulátor průběžně přizpůsobuje změnám procesu. V současnosti se dá říci, že automatické nastavování (auto-tuning), je pravděpodobně nejpoužívanější aplikace adaptivní regulace. Automatické nastavení se specifikuje jako postup, kdy regulátor sám identifikuje soustavu a změní své parametry. Většinou uživatel stiskne příslušné tlačítko, kdy odstartuje proces ladění.

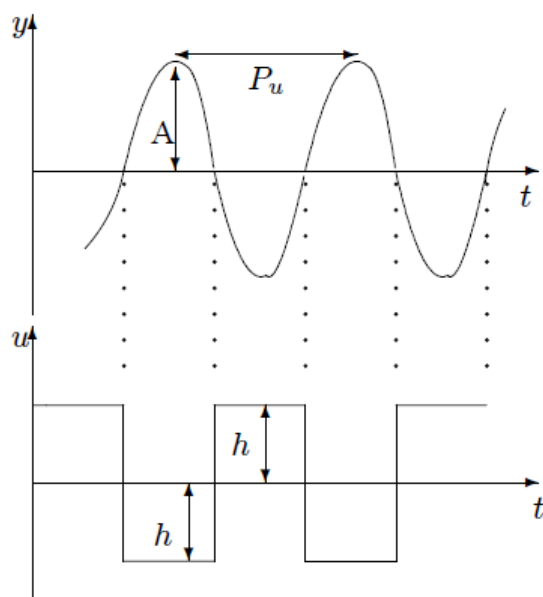
Postupů pro auto-tuning je celá řada. Pro regulátor horkých vtoků bude použita rozkmitávací metoda pomocí reléové nelinearity ve zpětné vazbě. Jde o velmi známou metodu popsanou v [14]. Na výstupu procesu vznikne trvalá oscilace, ze které je možné získat kritické zesílení  $K_{krit}$ , a kritickou periodu  $T_{krit}$ . Parametry PSD regulátoru se potom určují z těchto hodnot např. použitím Ziegler Nicholsových vztahů podle [14].

Tato metoda je velmi robustní a v praxi poměrně dobře použitelná, pokud technologie regulované soustavy dovolí krátkodobé kmitání. Navíc má metoda výhodu v tom, že není třeba dopředu vhodně určit periodu vzorkování, perioda vzorkování může být určena až na základě znalosti  $T_{krit}$ .

Zapojení pro realizaci reléového auto-tuningu je na Obrázek 3.21.



Obrázek 3.21 - Zapojení relé ve zpětné vazbě auto-tuningu



Obrázek 3.22 - Průběh výstupní veličiny při relé ve zpětné vazbě

Podle [14] platí pro výpočet kritického zesílení z parametrů relé a z amplitudy oscilující regulované veličiny vztah

$$K_{krit} = \frac{4h}{\pi A} \quad [-] \quad (3.11)$$

kde:

$h$  – amplituda relé

$A$  – amplituda regulované veličiny

Vztah (3.11) platí pro relé bez hystereze.

Kritickou periodu lze změřit z průběhu periody oscilující regulované veličiny  $P_u$ .

Regulátor	$K_u$	$T_i$	$T_d$
P	$0,5 \cdot K_{krit}$	-	-
PI	$0,4 \cdot K_{krit}$	$0,8 \cdot P_u$	-
PID	$0,6 \cdot K_{krit}$	$0,5 \cdot P_u$	$0,125 \cdot P_u$

Tabulka 9 - Nastavení PID parametrů z kritického zesílení a kritické period ZN metodou [11]

Návrh zařízení bude sestávat z několika kroků. Jako první se provede identifikace systému, který bude výsledným zařízením regulován. Je potřebné znát časové konstanty řízeného systému kvůli stanovení vzorkovací frekvence A/D převodníku měřícího modulu. Dále bude následovat návrh zapojení měřícího modulu, firmware měřícího modulu, zapojení silové části zařízení a obslužnou aplikaci pro PC.

### 3.11 Identifikace parametrů soustavy

Každá vtoková soustava se skládá z většího počtu nezávislých teplotních zón. Jednotlivé zóny mají použity topná tělesa rozdílných elektrických výkonů a ohřívají různě velké masy kovu. Z tohoto důvodu se dá na vtokovou soustavu pohlížet jako na soubor tepelných dynamických soustav s různými přenosy.

Z důvodu že nejsou známy přenosy jednotlivých soustav, je potřeba nejprve získat přenos soustavy s časovými konstantami a udělat si představu o regulovaném systému. Dá se předpokládat, že nejmenší časové konstanty bude mít zóna na ústí trysky, kde je masa kovu nejmenší, naopak největší časové konstanty se dají očekávat na těle rozvodového bloku.

Aby bylo možno provést syntézu technického řešení, je potřebné znát hlavně časové konstanty nejrychleji reagující zóny kvůli periodě vzorkování teploty. To znamená, že je třeba aproximovat přechodovou charakteristiku řízeného systému nějakým vhodným matematickým modelem (přenosem) a získat časové konstanty systému. K získání přenosu soustavy se použije experimentální způsob identifikace z naměřených dat [15] [16].

#### 3.11.1 Sběr naměřených dat

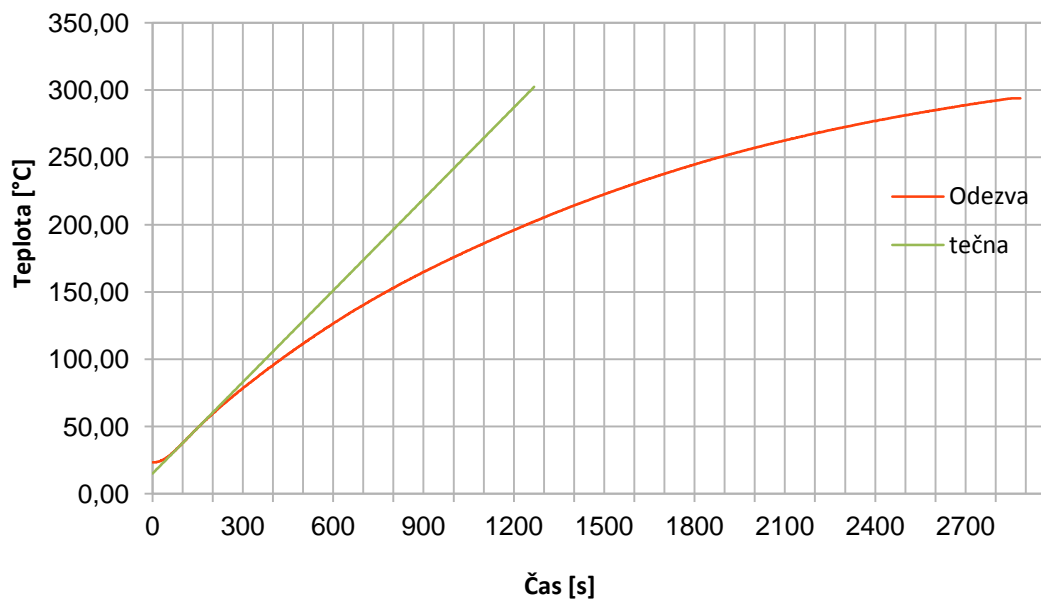
Pro sběr dat byl proveden následující experiment. Z technické dokumentace ke vtokové soustavě formy byla vytipována zóna u ústí trysky. Topné těleso dané zóny bylo připojeno k síti 230 V přes vypínač, jistič a výkonovou diodu AEG D22/400D. Dioda zajistí napájení tělesa jen jednou půlvlnou síťového napětí, tím pádem omezí elektrický výkon tělesa přesně na 50 % jeho celkového výkonu.

Teplota zóny se měřila zabudovaným termočlánkem typu J pomocí procesního kalibrátoru M505D. Daný kalibrátor poskytuje funkci datového záznamníku a naměřené data ukládá ve formátu CSV.

Teplota formy a vtokové soustavy byla ustálena na teplotě 23,37 °C. Spustil se záznamník hodnot teploty, zapnul vypínač od topného tělesa a tím byl vytvořen skok vstupní akční veličiny z 0 na 50 %.



Experiment běžel až do doby nového ustáleného stavu, kdy se už teplota dané zóny dále nezvyšovala. Data z kalibrátoru byla dále zpracována v programu MS Excel.

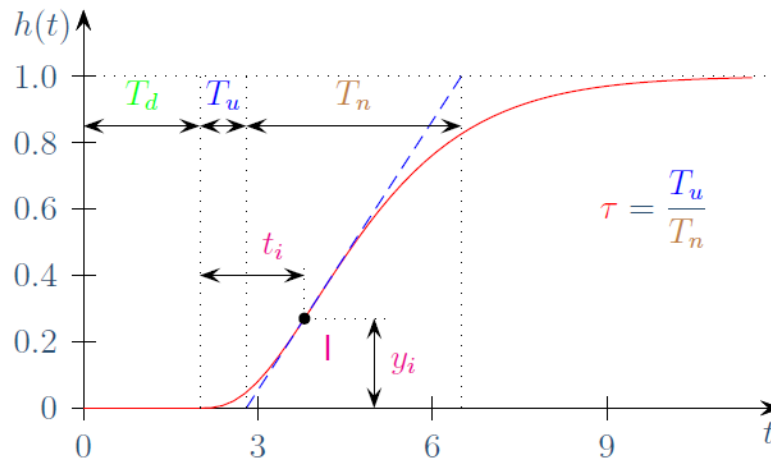


Obrázek 3.23 - Změřená přechodová charakteristika špičky vtokové soustavy při 50% skoku vstupní akční veličiny.

### 3.11.2 Metoda identifikace

K určení přenosu soustavy se používají nejrůznější metody identifikace. Protože je z Obrázek 3.23 patrné že se jedná o odezvu systému s aperiodickým průběhem, lze jí aproximovat pomocí soustavy druhého řádu s rozdílnými časovými konstantami, nebo proporcionální soustavu n-tého řádu s jednou časovou konstantou.

Byla provedena experimentální identifikace Strejcovou metodou [16]. Strejcová metoda aproximace přechodových charakteristik je jednou z nejjednodušších a snadno použitelných metod aproximace přechodových charakteristik pro statické soustavy. Při této metodě se předpokládá, že kořeny charakteristické rovnice jsou reálné a záporné. Metoda umožňuje aproximovat naměřené data soustavami n-tého řádu se stejnými časovými konstantami, nebo soustavami druhého řádu s různě velkými časovými konstantami. O způsobu aproximace se rozhodne podle úseků, které vytíná na časové ose tečna, sestřená v inflexním bodě aproximované přechodové charakteristiky.



**Obrázek 3.24 - Přechodová charakteristika systému druhého řádu [15]**

- $T_d$  – dopravní zpoždění [s]
- $T_u$  - doba průtahu [s]
- $T_n$  - doba náběhu [s]
- $I$  - inflexní bod o souřadnicích  $[t_i, y_i]$

### 3.11.3 Postup identifikace soustavy

Provedl se výpočet zesílení soustavy  $K$

$$K = \frac{y(\infty) - y(0)}{u(\infty) - u(0)} = \frac{293,74 - 23,37}{50 - 0} = 5,4074 \text{ } ^\circ\text{C}/\% \quad (3.12)$$

Přechodová charakteristika byla normalizovaná v amplitudě na hodnotu 1. Přepočít se provedl v programu MS Excel, přes jednotlivé vzorky vztahem

$$\bar{y}(t) = \frac{y(t) - y(0)}{y(\infty) - y(0)} \quad (3.13)$$

Z normalizovaných výstupních hodnot byl numericky nalezen inflexní bod (bod zvratu, lokální maximum derivace funkce) přes jednotlivé vzorky vztahem

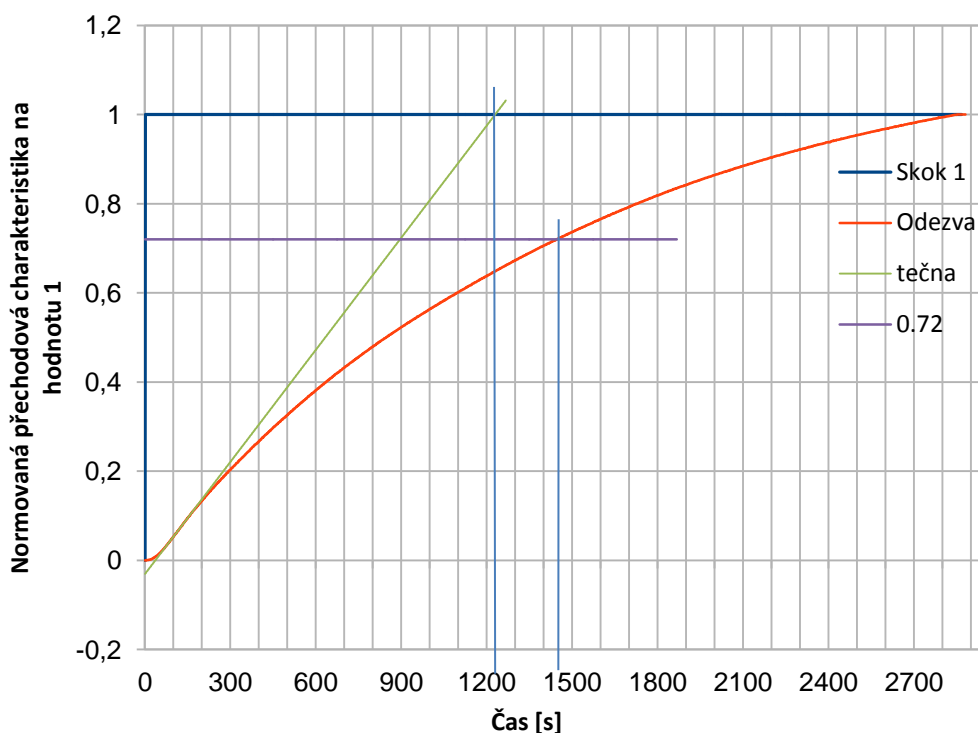
$$max = \frac{y(t)_{i-1} - y(t)_{i-2}}{t_{(i)} - t_{(i-1)}} \quad (3.14)$$

Podle výpočtů v MS Excel se inflexní bod nachází v 162 sekundě přechodové charakteristiky. Ze znalosti polohy inflexního bodu byl vypočten sklon tečny v inflexním bodě pomocí funkce lineární regrese. Pro funkci bylo použito šest hodnot

z levého okolí a šest hodnot z pravého okolí inflexního bodu. Funkce lineární regrese vrátila koeficienty pro rovnici přímky, která je tečnou inflexního bodu

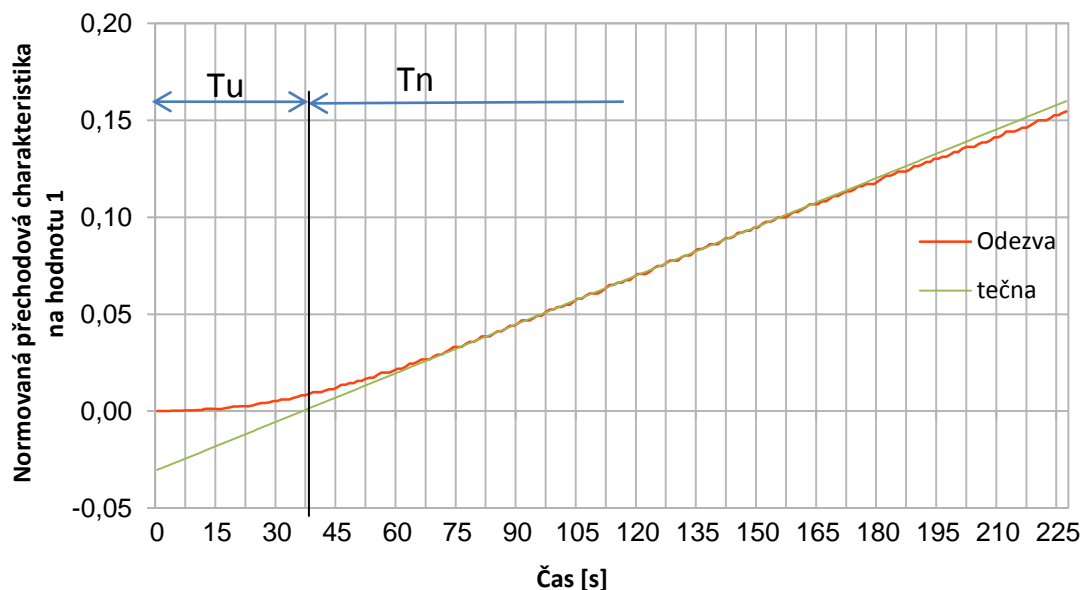
$$y = b * t + a \Rightarrow 0,00083834 * t - 0,0572 \quad (3.15)$$

Podle rovnice přímky (3.15) se v MS Excel vykreslila tečna v inflexním bodě přechodové charakteristiky. Tečna protнула časovou osu v bodě, který je rozhodující pro konec doby průtahu  $T_u$  a začátek doby náběhu  $T_n$ . Doba náběhu je určena průsečíkem tečny v inflexním bodě s časovou osou a s pořadnicí ustáleného stavu



**Obrázek 3.25 - Normovaná přechodová charakteristika**

Z grafu Obrázek 3.25 je vidět, že konec doby náběhu je v 1216 sekundě přechodové charakteristiky. Protože je začátek přechodové charakteristiky málo detailní, vytvořil se výřez začátku přechodového děje Obrázek 3.26.



Obrázek 3.26 - Výřez začátku přechodové charakteristiky

Z obrázku 3.25 a 3.26 jsou patrné časové hodnoty:

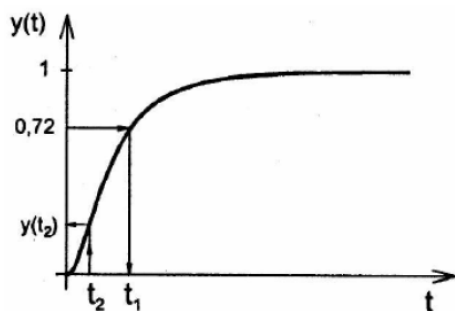
- Konec doby průtahu a začátek doby náběhu 37 sekunda.
- Konec doby náběhu 1216 sekunda.

Typ aproximačního modelu se zjistí z podílu doby průtahu a doby náběhu.

$$\tau = \frac{T_u}{T_n} = \frac{37}{1216-37} = 0,031 \quad (3.16)$$

Z důvodu, že  $\tau < 0,1$  provede se aproximace přenosem druhého řádu s rozdílnými časovými konstantami podle (3.17).

$$G(p) = \frac{K}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)} \quad (3.17)$$



Obrázek 3.27 - Aproximace přenosem druhého řádu s rozdílnými časovými konstantami [16]

Z obrázku 3.25 se odečte hodnota  $t_1$  při  $0,72y = 1441$  s, a vypočte součet časových konstant podle vztahu.

$$T_1 + T_2 = \frac{t_1}{1,2564} = \frac{1441}{1,2564} = 1146,92 \text{ s} \quad (3.18)$$

Dále se vypočte časový okamžik  $t_2$ :

$$t_2 = 0,3574(T_1 + T_2) = 410 \text{ s} \quad (3.19)$$

Z grafu normované přechodové charakteristiky se odečte hodnota  $y(t_2) = 0,27$ .

$y(t_2)$	$\tau_2$	$y(t_2)$	$\tau_2$	$y(t_2)$	$\tau_2$
0,3	0	0,25	0,105	0,2	0,264
0,29	0,023	0,24	0,128	0,19	0,322
0,28	0,043	0,23	0,154	0,18	0,403
0,27	0,063	0,22	0,183	0,17	0,538
0,26	0,084	0,21	0,219	0,16	1

**Tabulka 10 - Určení poměru časových konstant  $\tau_2$  [16]**

Z tabulky 1 se určí poměr časových konstant  $\tau_2$ :

$$\tau_2 = \frac{T_1}{T_2} = 0,063 \quad (3.20)$$

Ze známého součtu a podílu časových konstant  $T_1$  a  $T_2$  se vypočtou jednotlivé časové konstanty:

$$T_1 = 68 \text{ s}$$

$$T_2 = 1079 \text{ s}$$

Dosažením časových konstant vznikne přenos systému.

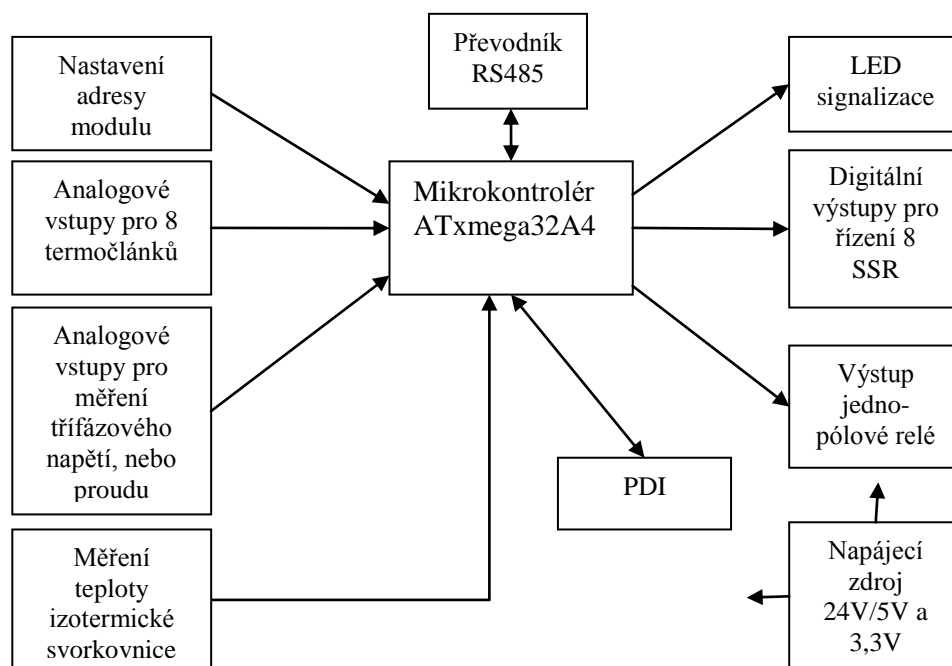
$$G(p) = \frac{5,4}{(68p+1)(1079p+1)} \quad (3.21)$$

## 4 NÁVRH MĚŘÍCIHO MODULU

V předešlých částech byla věnována pozornost teoretickému rozboru, co by zařízení mělo obsahovat, proběhla identifikace systému a nyní se již přistoupí ke konkrétnímu obvodovému návrhu.

Na obrázku 4.1 je zobrazeno blokové schéma navrhovaného měřicího modulu. Jednotlivé části modulu jsou podrobněji popsány v následujících kapitolách. Celkové schéma zapojení je v příloze 1. Modul je podle zadání z kapitoly 3 schopen změřit hodnoty napětí z 8 termočlánků a ovládat 8 SSR relé pro regulaci výkonu topných těles.

Kromě této základní funkčnosti je modul schopen změřit třífázové napětí, nebo proud. Měření třífázového napětí a proudu pro diagnostiku topných těles je rozděleno na dva měřicí moduly. Toto řešení se dá použít z toho důvodu, že navrhované měřicí moduly mají pokrýt segment modulárních mnoho zónových regulátorů horkých vtoků, tím pádem se předpokládá použití více měřicích modulů v jednom zařízení. Průběh diagnostiky a měření výkonů jednotlivých těles řídí ovládací program v PC.

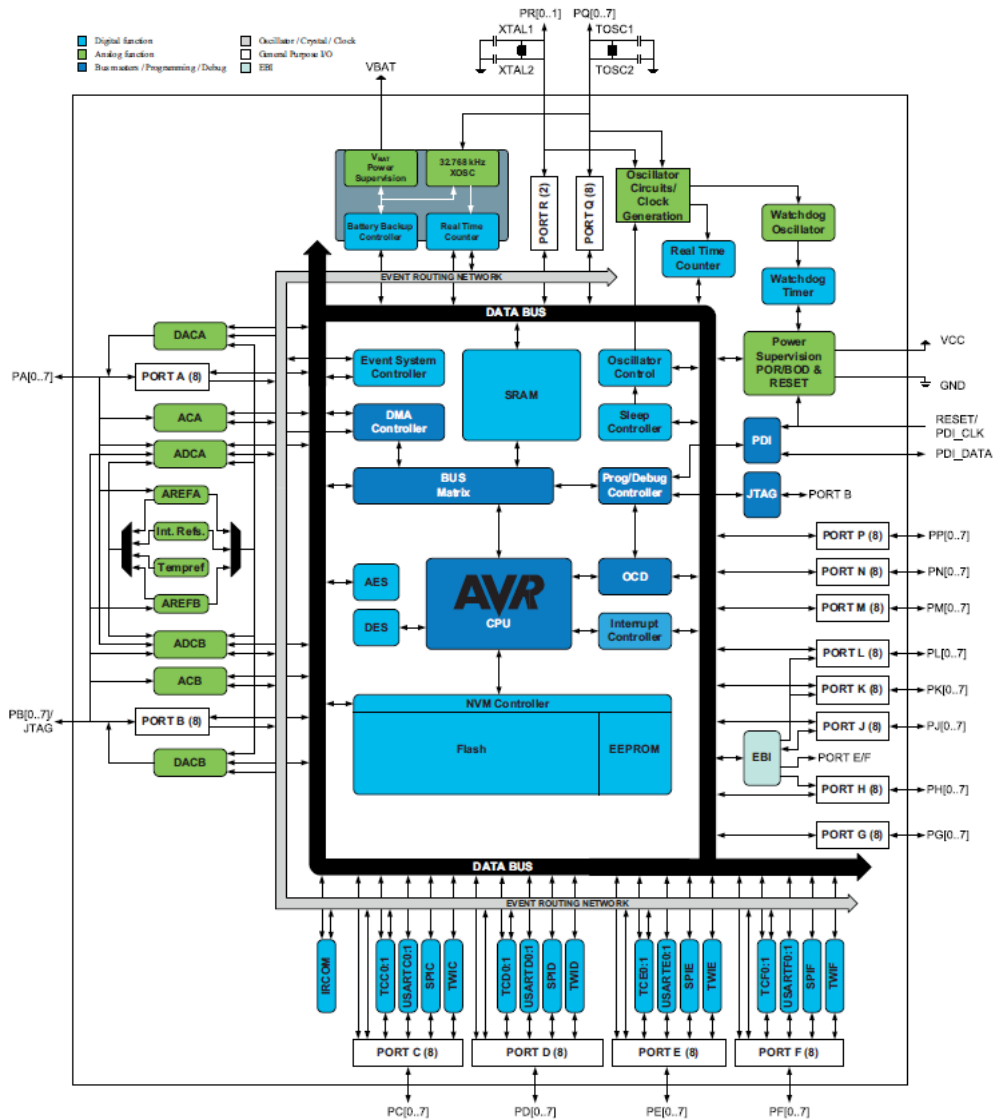


Obrázek 4.1 - Blokové schéma měřicího modulu

Pro korektní návrh kompletní desky plošných spojů (DPS) měřicího modulu bylo nutné provádět dílčí testy jednotlivých částí desky v nepájivém poli.

## 4.1 Návrh mikrokontroléru a přilehlých obvodů

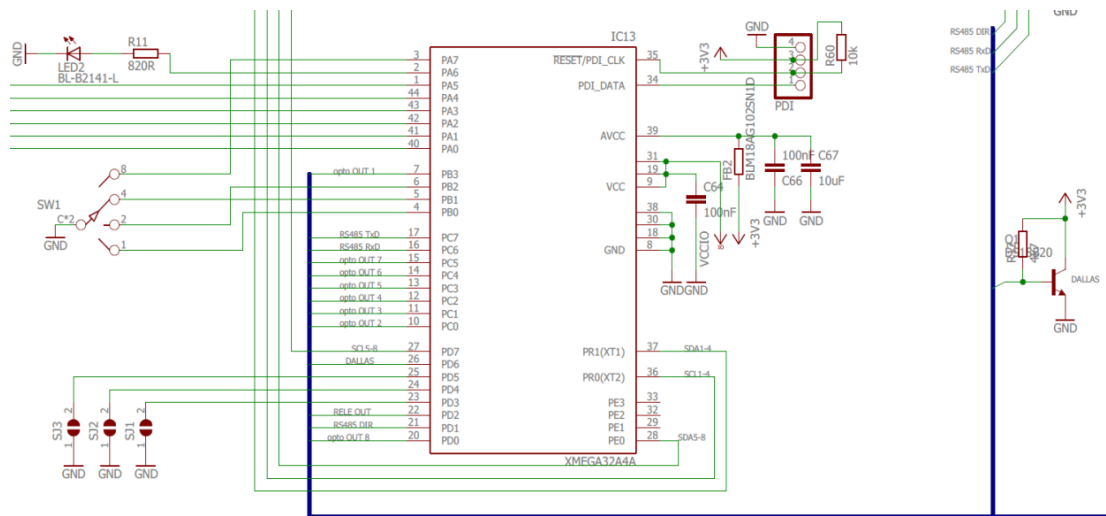
Pro měřicí modul byl zvolen 8 bitový vysoce výkonný, nízko příkonový mikrokontrolér (MCU) řady ATMEL AVR ATxmega32A4 s redukovanou instrukční sadou založenou na AVR RISC architektuře [17]. Tento typ MCU poskytuje dostatečné množství pinů a periférií, včetně paměti o velikosti 32kB, která je dostačující pro danou aplikaci. Volba tohoto procesoru byla ovlivněna jeho nízkou cenou, dostupností a praktickými zkušenostmi s řadou MCU ATMEL AVR. MCU lze snadno naprogramovat v jazyce C pomocí vývojového prostředí Atmel studio 7, který je zdarma ke stažení u firmy Atmel. Na Obrázek 4.2 je zobrazeno rozložení vývodů a blokové schéma MCU.



Obrázek 4.2 - Blokové schéma MCU ATxmega [17]

Základní vlastnosti MCU jsou:

- Paměti
  - FLASH paměť 32 kB
  - EEPROM paměť 1 kB
  - SRAM paměť 4 kB
- Pracovní frekvence do 32 MHz (možnost použít interní oscilátor).
- Pětkrát 16 bitový čítač/časovač.
- Pětkrát rozhraní USART.
- Watch-dog Timer.
- 12 kanálový 12 bitový A/D převodník (2 Msps).
- Programově nastavitelný předzesilovač se zesílením 2, 4, 8, 16, 32 nebo 64.
- 2 kanálový 12 bitový D/A převodník (1 Msps).
- Pracovní napětí 1,6 V až 3,6 V.
- Maximální proud na jeden I/O pin 20 mA.
- Maximální proud na pouzdro 200 mA.
- Programovací a ladicí rozhraní JTAG a PDI.



Obrázek 4. 4.3 - Zapojení mikroprocesoru ATxmega32A4 s přílehlými obvody

Pro volbu adresy modulu byl zvolen hexa přepínač, který umožňuje nastavení adresy v rozsahu 0-15. Adresa 0 se nevyužívá, je vyhrazena pouze pro broadcast zprávy, viz popis protokolu Modbus. Nastavením adres jednotlivých modulů v rozsahu 1-15, je možno sestavit regulátor horkých vtoků až pro 120 zón.

Přepínač je zapojen na 4 piny MCU, nastaveny jako vstupní s interními pull-up rezistory, které nastavují piny na hodnotu logické 1. Přepínač podle nastaveného čísla vytváří logické 0 na příslušných pinech.



Na pin PA6 je připojena LED, která signalizuje stav měřicího modulu. Je použita dioda BL-B2141-L, dosahující typickou svítivost při  $U_f = 1,8 \text{ V}$  a  $I_f = 2 \text{ mA}$ . Rezistor R11 se vypočte podle vztahu

$$R11 = \frac{U_{pin} - U_f}{I_f} = \frac{3,3V - 1,8V}{0,002A} = 750 \Omega \quad (4.1)$$

Hodnota odporu R11 byla vybrána  $820 \Omega$  z odporové řady E12, která je nejbližší vypočtené hodnotě  $750 \Omega$ , snížení proudu diodou je minimální a na svítivosti diody se to nepozná.

Zapojení resetovacího obvodu, PDI rozhraní a hodnoty blokovacích kondenzátorů včetně feritových filtrů byly převzaty z [18]. Pro reset obvodu je použit mód Power-On reset (POR). Resetovací sekvenci spouští detekční obvod na čipu při dosažení prahového napětí VCC. Tento mód resetu se uplatňuje ve chvíli, kdy se zapne napájení měřicího modulu. Dále je pro reset obvodu používán Watchdog Reset, který pracuje na základě časovače watchdog (WDT). Je to funkce systému na monitorování správného chodu programu, hlavně zacyklení. V případě, že WDT není vynulován programem ve stanoveném čase, spustí se reset obvodu.

Pro taktování obvodu je použit interní RC oscilátor s frekvencí  $32 \text{ MHz}$ . Na pin PD6 je připojen obvod DS18B20 [19] pro měření teploty, který s MCU komunikuje po sběrnici 1-Wire [19].

## 4.2 Návrh části snímání termočlánků

Pro měření termoelektrického napětí z termočlánků bylo potřeba vybrat vhodné obvody. Ve snaze vyhnout se používání konstrukcí s operačními zesilovači kvůli úspoře místa, byl vybrán A/D převodník s dostatečnou citlivostí a rozlišením. Dostupné A/D převodníky se liší jak svými rozlišeními, tak i vzorkovacími frekvencemi. Proto bylo potřeba zvolit kompromis mezi rozlišením, vzorkovací frekvencí, dostupností a cenou A/D převodníku. Z důvodu velkých časových konstant regulovaného systému byl pro měření napětí termočlánků vybrán nízko šumový přesný delta-sigma A/D převodník MCP3424 [20]. Výhoda tohoto převodníku je v tom, že v jednom pouzdře jsou k dispozici čtyři analogové diferenční vstupy. Pro modul s osmi termočláňkovými vstupy stačilo použít dvě pouzdra, čímž se výrazně ušetřilo místo na DPS. Tento převodník má vzorkovací frekvenci při maximálním rozlišení  $3,75$  vzorků za sekundu. Díky multiplexování mezi čtyřmi analogovými vstupy je vzorkovací frekvence jednoho vstupu  $1,06 \text{ s}$ . Protože neexistuje jednoznačná metodika na určení vzorkovací frekvence, uvádí se jako jeden z návodů použít  $1/10$  z největší časové konstanty dynamického systému, která je podle (3.21)  $1079 \text{ s}$ . Z tohoto hlediska je vzorkovací frekvence  $1 \text{ s}$  na kanál použitého A/D převodníku dostatečná. Navíc jako jeden z mála obvodů, které jsou dostupné pro zpracování napětí z termočlánků, má rozlišení  $18$  bitů.

Z důvodu, že převodník MCP3424 nedisponuje funkcí linearizace termočlánků, ani korekce teploty srovnávacího konce termočlánku, se toto vyřešilo v návrhu měřícího modulu.

Základní vlastnosti převodníku jsou:

- Rozlišení 18 bitů.
- Napájecí napětí 2,7 V až 5,5 V.
- Interní programovací zesilovač se zesílením 1,2,4,8x.
- Komunikační rozhraní I<sup>2</sup>C.
- Interní napěťová reference 2,048 V s přesností ±0,05 %.
- Vzorkovací frekvence při 18 bitovém rozlišení 3,75 vzorků za sekundu.

Před samotným obvodovým návrhem modulu bylo potřebné rozhodnout, který způsob kompenzace studeného bodu a typ linearizace se použije. Podle kapitoly 3.6 je pro zařízení nejideálnější řešením použití metody izotermické svorkovnice podle Obrázek 3.11. Jak je patrné z Obrázek 3.1, jsou termočlánky jednotlivých zón horkých vtoků vyvedeny do krabice umístěné na vstříkovací formě a ukončeny průmyslovými konektory HARTING. Za provozu je forma vložena do vstříkovacího lisu a od regulátorů horkých vtoků bývá většinou vzdálena několik metrů cca 5-10 m. Díky různým tepelným režimům formy dochází v prostoru krabice s konektory k výkyvům teploty v řádu desítek °C.

Pro kompenzaci vlivu těchto výkyvů teploty jsou k dispozici dvě možnosti. Při první možnosti lze krabici s konektory považovat za izotermickou svorkovnici a použít pro spojovací vedení k regulátorům horkých vtoků CU vedení. Pro měření teploty izotermické svorkovnice je potřeba ke svorkovnici přivést čidlo teploty, kterým je vybaven měřící modul. Tato možnost má výhodu v tom, že spojovací CU vedení je levnější než prodlužovací vedení z materiálů shodných s termočlánky, ale má nevýhodu v nutnosti instalaci teplotního čidla do krabice s konektory na vstříkovací formě.

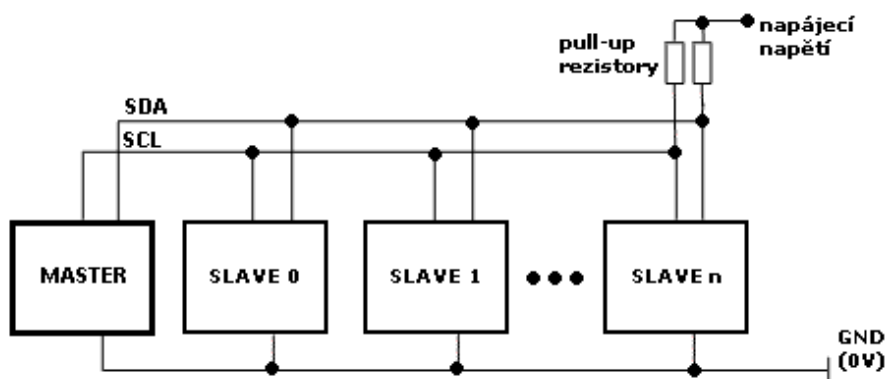
Jednodušším je druhý způsob, při kterém se použije prodlužovací vedení shodné s typem termočlánků, které jsou použity v horkých vtocích, a izotermická svorkovnice se vytvoří přímo v rozvaděči regulátorů. Tento způsob má nevýhodu v tom, že když některá forma bude používat jiný typ termočlánků, bude se muset vyměnit prodlužovací vedení vhodné pro daný typ termočlánků.

Linearizace termočlánekového napětí a korekce teploty izotermické svorkovnice probíhá v PC aplikaci viz kapitola 7.

### **4.2.1 Komunikace A/D převodníku sběrnici I<sup>2</sup>C.**

Pro komunikaci mezi MCU a analogovými převodníky byla použita sběrnice I<sup>2</sup>C (Internal-Integrated-Circuit Bus) [21], kterou disponuje MCP3424. Jedná se o interní datovou sběrnici vyvinutou firmou Philips sloužící pro komunikaci a přenos dat mezi jednotlivými integrovanými obvody většinou v rámci jednoho zařízení. Hlavní výhodou

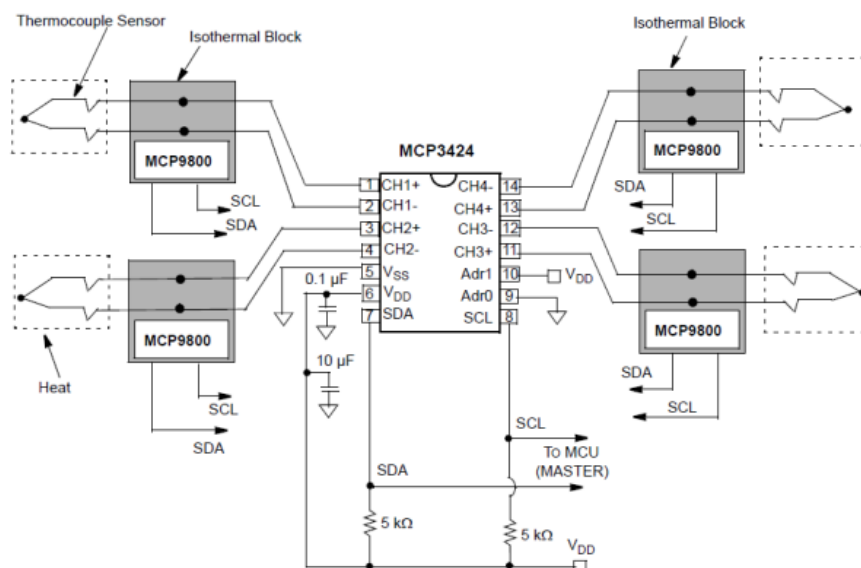
je, že obousměrný přenos probíhá pouze po dvou vodičích - "data SDA (serial data)" a "hodiny SCL (serial clock)". To především u MCU výrazně optimalizuje nároky na počet vstupně-výstupních pinů a celkově zjednodušuje výsledné zapojení. Na jednu sběrnici může být připojeno více integrovaných obvodů. V základní verzi jsou obvody adresovány 7 bitově a v rozšířené verzi 10 bitově. To umožňuje připojení čipů s různou adresou na jednu společnou sběrnici. Přenosová rychlost sběrnice je pro většinu aplikací dostatečná i v základní verzi, kde je frekvence hodin 100 kHz. Ve vylepšených verzích to může být 400 kHz nebo 1 MHz. Rychlost přenosu musí být přizpůsobena nejpomalejšímu čipu na sběrnici. Oba vodiče musí být implicitně v logické jedničce a to je zajištěno pull-up rezistory.



Obrázek 4.4 - Zapojení sběrnice I<sup>2</sup>C

## 4.2.2 Zapojení MC3424 a vstupních obvodů

Na Obrázek 4.5 je základní zapojení MC3424 pro měření termočlánků, ze kterého byly převzaty hodnoty pasivních součástek v napájení a komunikaci. Samotné připojení termočlánků bylo vyřešeno pomocí ochranných prvků a vstupního filtru viz popis níže.



Obrázek 4.5 - Základní zapojení obvodu MCP3424 [20]

Převodník je napájen napětím 3,3 V a u napájecího pinu jsou použity dva kondenzátory pro filtraci napájecího napětí podle doporučení výrobce o kapacitě 0,1 µF a 10 µF. Tyto kondenzátory slouží pro filtraci vysokofrekvenčního rušení a jako zdroj proudu ve chvíli krátkodobé vyšší spotřeby. Pro I<sup>2</sup>C sběrnici jsou použity pull-up rezistory 5 kΩ.

Termoelektrické napětí je měřeno přímo pomocí diferenčních vstupů, které mají dostatečnou citlivost pro měření termočlánekových napětí bez nutnosti použití externích zesilovacích obvodů.

Převodník má interní napětí referenci 2,048 V. Při maximálním rozlišení 18 bitů a použití maximálního interního zesílení 8 je citlivost vstupu.

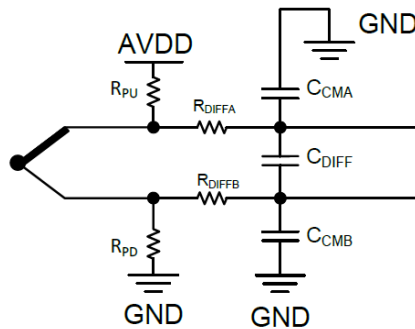
$$V_{IN\_min} = \frac{LSB}{PGA} = \frac{U_{ref}}{2^{N-1} \cdot PGA} = \frac{2,048V}{2^{18-1} \cdot 8} = 1,95 \mu V \quad (4.3)$$

Při termoelektrické konstantě pro termočlánek typu J 52,3 µV/°C je rozlišení teploty.

$$T_{min} = \frac{V_{IN\_min}}{\alpha_J} = \frac{1,95 \mu V}{52,3 \mu V/^{\circ}C} = 0,0373 \text{ }^{\circ}C \quad (4.4)$$

I když má A/D převodník z principu své funkce sigma delta převodu filtrační schopnost, je potřeba před vstup přidat alespoň pasivní RC filtr prvního řádu typu dolní propust. Ten má za úkol odfiltrout vysokofrekvenční šum a taky poskytnout anti-aliasing filtr splňující požadavek Shannon-Kotelnikovův teorému. Podle teorému měřený kmitočet může mít maximálně poloviční frekvenci vzorkovací frekvence.

Na Obrázek 4.6 je doporučené zapojení od firmy Texas Instruments pro vstupní filtry A/D převodníků s diferenčním vstupem.



**Obrázek 4.6 - Typický diferenční a common-mode filtr [22]**

Rezistory  $R_{PU}$  a  $R_{PD}$  jsou zapojeny jako pull-up a pull-down. Jejich úkolem je v případě rozpojení termočlánek nastavit na diferenčních vstupech maximální napětí. Potom A/D převodník vygeneruje na svém výstupu maximální číslo ( $2^{18-1} - 1 = 131\,071$ ), které se vyhodnotí jako přerušovaný termočlánek. Při výběru hodnoty daných rezistorů se musí dbát na to, aby elektrický proud procházející přes rezistory a termočlánek neovlivňoval přesnost měření tím, že by se termočlánek přechodem proudu ohříval. Z tohoto důvodu se doporučuje volit rezistory v rozmezí od 1 M $\Omega$  do 50 M $\Omega$ .

Zapojení podle Obrázek 4.6 poskytuje pasivní diferenční RC filtr prvního řádu, který je tvořen rezistory  $R_{DIFFA}$ ,  $R_{DIFFB}$  a kondenzátorem  $C_{DIFF}$ , sloužící jako anti-aliasing filtr. Mezní frekvence se vypočítá podle vztahu (4.5) převzatého z [22], kde se doporučuje použití kondenzátorů  $C_{CMA}$  a  $C_{CMB}$  stejné hodnoty o řád menší než je hodnota  $C_{DIFF}$ .

$$f_0 = \frac{1}{2\pi(R_{DIFFA} + R_{DIFFB})\left(C_{DIFF} + \frac{C_{CM}}{2}\right)} \text{ [Hz]} \quad (4.5)$$

$f_0$  - je mezní kmitočet filtrů RC [Hz]

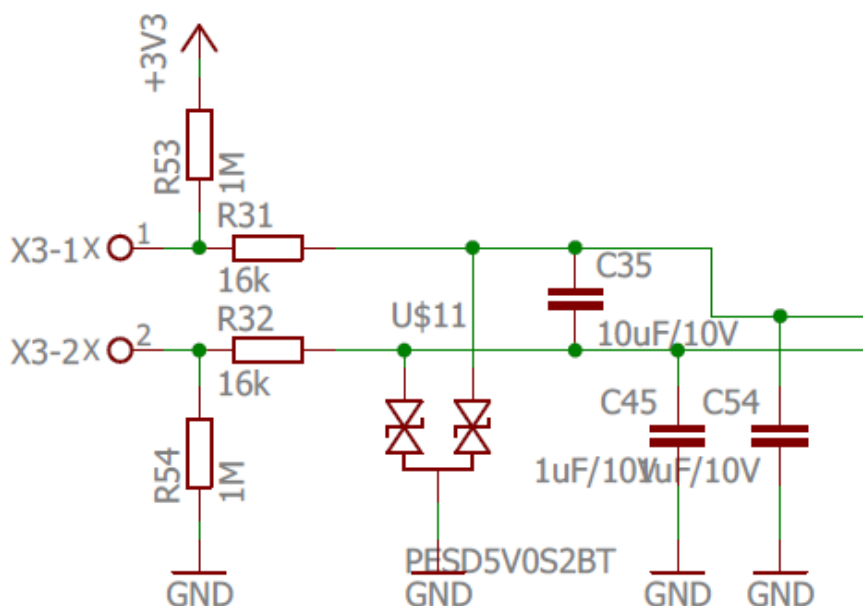
Při výpočtu filtru je vhodné postupovat tak, že se nejdřív zvolí hodnota kondenzátoru  $C_{DIFF}$ , dopočte se hodnota rezistorů  $R_{DIFFA}$ ,  $R_{DIFFB}$  tak, aby mezní kmitočet filtru byl na  $\frac{1}{2}$  vzorkovací frekvence. Kondenzátor se volí z toho důvodu, že rezistory jsou vyráběny v širší hodnotové škále a tak je možnost najít hodnotu rezistoru nejbližší vypočtené hodnotě.

Vzorkování každého kanálu probíhá s frekvencí 1 Hz, proto mezní kmitočet filtru musí být maximálně 0,5 Hz. Kondenzátor  $C_{DIFF}$  byl zvolen 10  $\mu\text{F}$  potom kondenzátory  $C_{CMA}$  a  $C_{CMB}$  podle popisu výše mají hodnotu 1  $\mu\text{F}$ . Hodnota rezistorů byla dopočtena podle vzorce (4.6).

$$(R_{DIFFA} + R_{DIFFB}) = \frac{1}{2\pi f_0 \left( C_{DIFF} + \frac{C_{CM}}{2} \right)} = \frac{1}{2\pi * 0,5 * \left( 10 * 10^{-6} + \frac{1 * 10^{-6}}{2} \right)} = 30315 \Omega \quad (4.6)$$

Byla vypočtena hodnota součtu rezistorů  $R_{DIFFA}$ ,  $R_{DIFFB}$  30315  $\Omega$  z čeho vyplývá,  $R_{DIFFA}=R_{DIFFB}=15157 \Omega$ . Z odporové řady E24 se vybrala nejbližší vyšší hodnota rezistorů 16 k $\Omega$ . Vyšší hodnota se zvolila proto, aby se mezní kmitočet filtru nedostal přes ½ vzorkovací frekvence.

Průchodem proudu přes odpory filtru se vnáší do měření dodatečný offset, který je potřeba eliminovat kalibrací.



**Obrázek 4.7 - Filtr prvního řádu typu dolní propust termočláňkového vstupu**

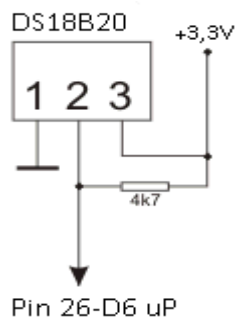
Na Obrázek 4.7 je zapojení jednoho termočláňkového vstupu měřicího modulu, kde je kromě filtru použita ještě ochrana proti napěťovým špičkám ESD a indukovanému přepětí.

### 4.3 Návrh části měření teploty izotermické svorkovnice

Pro měření teploty izotermické svorkovnice kvůli kompenzaci teploty byl vybrán digitální teplotní senzor DS18B20 [19]. Důvodem této volby byl fakt, že se jedná o senzor malých rozměrů s integrovaným digitálním rozhraním, kdy se dá bez dalších podpůrných obvodů jednoduše realizovat komunikace s MCU, navíc i teplotní rozsah včetně přesnosti je pro danou aplikaci vyhovující.

Základní vlastnosti senzoru jsou:

- Napájecí napětí 3 V až 5,5 V.
- Rozsah měřených teplot -55 °C až +125 °C.
- Přesnost  $\pm 0,5$  °C v rozsahu -10 °C až +85 °C.
- Rozlišení 12 bitů.
- Komunikace 1-Wire sběrnice.
- 8-bitový CRC.



**Obrázek 4.8 - Zapojení teplotního senzoru DS18B20 k MCU**

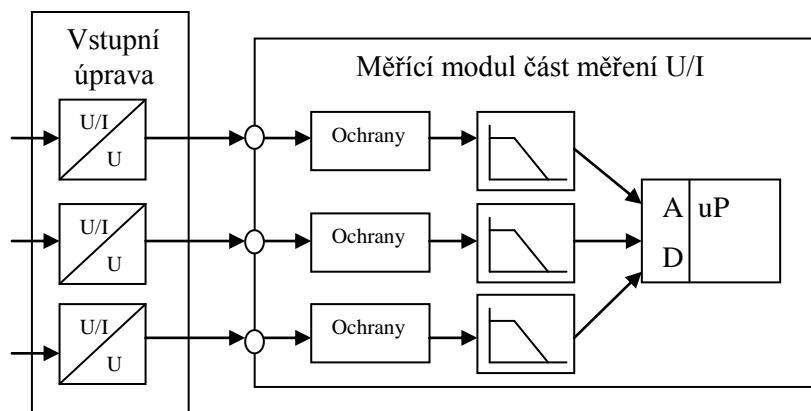
Senzor teploty je připojen na napájecí napětí 3,3 V a odpor 4k7 slouží jako pull-up pro datový pin 2 senzoru. Tento pin je připojen na pin MCU 26-D6.

Hodnota odporu byla převzata z katalogového listu teplotního senzoru. MCU komunikuje se senzorem pomocí 1-Wire sběrnice [19]. Senzor je možno k měřicímu modulu připojit pomocí konektoru a tak přes kabel přivést senzor přímo k izotermické svorkovnici.

#### **4.4 Návrh měření elektrického napětí a proudu**

Na základě zvážení výhod a nevýhod principů měření střídavých proudů a napětí podle kapitoly 3.8 byla zvolena RMS metoda měření efektivního napětí a proudu. Tato metoda je moderní a současně odpadnou problémy spojené se špičkovými detektory.

K měření je použit 12 bitový A/D převodník obsažen v MCU, včetně interní reference 1 V, která limituje maximální vstupní napětí. Na měřícím modulu jsou tři diferenční vstupy pro připojení vstupního signálu z prvků vstupní úpravy. Vstupy mají použité přepětřové ESD ochrany, dále je použit RC filtr prvního řádu pro filtraci rušivého napětí, který zároveň plní funkci anti-aliasing filtru.



**Obrázek 4.9 - Blokové schéma vstupní úpravy a měřicí části U/I**

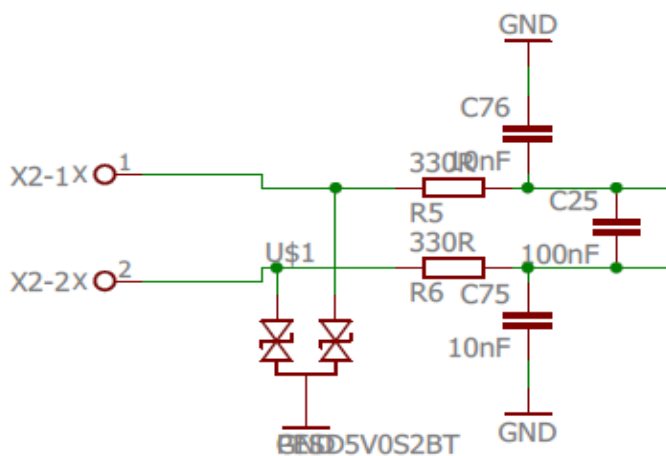
Podle doporučení z [23] je vhodné při měření střídavých elektrických proudů a napětí používat vzorkování v rozmezí alespoň 2-4 tisíc vzorků za sekundu.

V měřicím modulu je vzorkování spouštěno v přerušení každých 200  $\mu$ s, čímž se získá 5 tisíc vzorků za sekundu (vzorkovací frekvence 5 kHz, 50 vzorků na půlvlnu). Anti-aliasing filtr musí blokovat frekvence nad  $\frac{1}{2}$  vzorkovací frekvence, to znamená že  $f_0=2,5$  kHz. Hodnoty součástek byly vypočteny podle vzorce (4.7).

Kondenzátor  $C_{DIFF}$  byl zvolen 0,1  $\mu$ F a kondenzátory  $C_{CMA}$  a  $C_{CMB}$  mají hodnotu 10 nF. Hodnota rezistorů  $R_{DIFFA}$ ,  $R_{DIFFB}$  byla določtena podle vzorce (4.7).

$$(R_{DIFFA} + R_{DIFFB}) = \frac{1}{2\pi f_0 (C_{DIFF} + \frac{C_{CM}}{2})} = \frac{1}{2\pi * 2500 * (0,1 * 10^{-6} + \frac{10 * 10^{-9}}{2})} = 606,3 \Omega \quad (4.7)$$

Byla vypočtena hodnota součtu rezistorů  $R_{DIFFA}$ ,  $R_{DIFFB}$  606,3  $\Omega$  z čeho vyplývá,  $R_{DIFFA}=R_{DIFFB}=303,1 \Omega$ . Z odporové řady E24 se vybrala nejbližší vyšší hodnota rezistoru 330  $\Omega$ . Vyšší hodnota se zvolila proto, aby se mezní kmitočet filtru nedostal přes  $\frac{1}{2}$  vzorkovací frekvence.



**Obrázek 4.10 - Filtr prvního řádu typu dolní propust napěťového vstupu**



Na Obrázek 4.10 je zapojení jednoho napěťového vstupu měřicího modulu, kde je kromě filtru použita ještě ochrana proti napěťovým špičkám ESD a indukovanému přepětí.

Jak bylo uvedeno výše vstupní napětí do měřicího modulu je limitováno použitou referencí 1 V, a tím pádem i maximální hodnota výstupního napětí z obvodů vstupní úpravy musí být maximálně 1 V.

Pro vstupní úpravu měření proudu byl vybrán MTP řady JCXXF-XXXmA [24]. Transformátory mají různé proudové rozsahy s převodem 3000:1. Použitím vhodného zatěžovacího rezistoru lze dosáhnout na výstupu MTP střídavé maximální napětí 1 V na zvolený proudový rozsah a tak maximálně využít rozsah A/D převodníku.

Do zařízení byl zvolen typ JC10F. Pro maximální hodnotu 1 V na výstupu MTP při průchodu proudu 80 A je potřeba dosáhnout efektivní hodnotu na zatěžovacím rezistoru:  $U_{ef} = \frac{U_{max}}{\sqrt{2}} = \frac{1V}{\sqrt{2}} = 0,707 V$

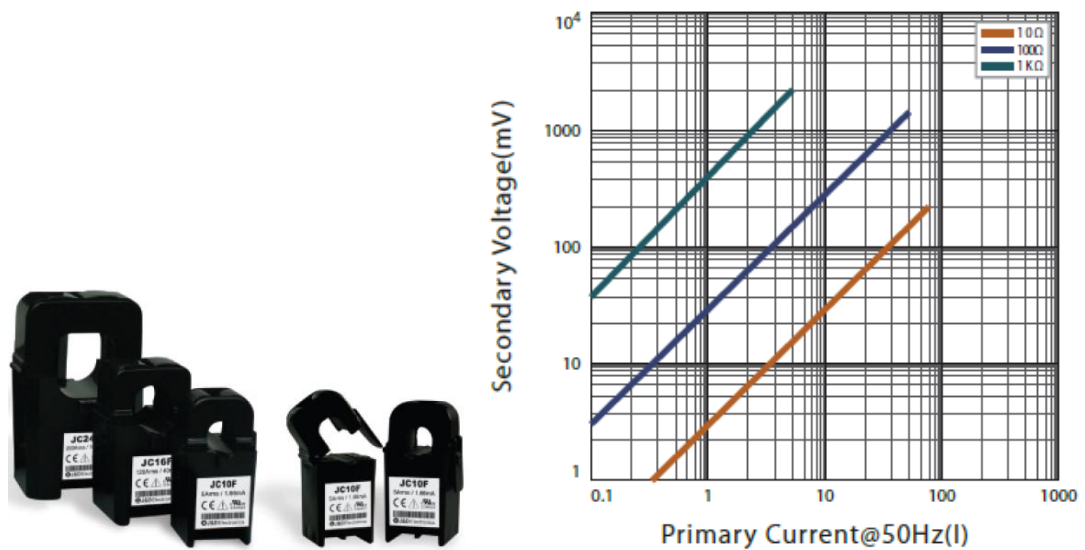
Zatěžovací odpor MTP je

$$R = \frac{U_{ef}}{\frac{I_{in}}{3000}} = \frac{0,707V}{\frac{80A}{3000}} = 26,6 \Omega \quad (4.8)$$

Z odporové řady se vybrala hodnota rezistoru 27  $\Omega$ .

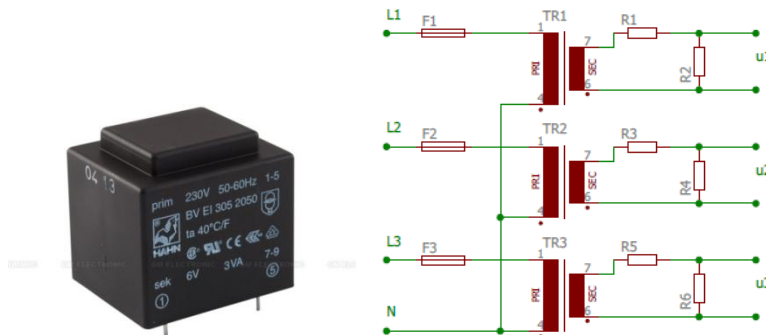
MODEL	JC10F	JC16F	JC24F
	Ø10	Ø16	Ø24
Current Ratio	5A/1.66mA	120A/40mA	200A/66.6mA
Current Range	0.01~80A (RL=10Ω)	0.01~120A (RL=10Ω)	0.01~200A (RL=10Ω)
Max.Continuous Current	120A	200A	300A
Nominal Phase Angle Error	+1.5±1°	+1.0±1°	+1.0±1°
Nominal Linearity Error	-1±1%	-1±1%	-1±1%
Turns Ratio	3000:1	3000:1	3000:1
DCR	360±25Ω	280±20Ω	171±15Ω
Protection Level	7.5V0-P	7.5V0-P	7.5V0-P
Insulation Category	CATIII		
Operating Condition	-20°C~+50°C, ≤85%RH, No condensation, In-house & Any direction installable		
Storage Condition	-30°C~+90°C, ≤85%RH, No condensation		

**Tabulka 11 - Parametry proudových transformátorů řady JCXXF-XXXmA [24]**



Obrázek 4.11 - Převodní tabulka proudových transformátorů JCXXF-XXXmA [24]

Dále bylo potřeba vyřešit MTN. Pro měření třífázového síťového napětí se použili tři transformátory v zapojení podle Obrázek 4.12.



Obrázek 4.12 - Zapojení MTN pro tři fáze

Transformátor má parametry:

- Výkon = 3 VA.
- $U_{\text{prim}} / \text{sek} = 230 \text{ V} / 1 \times 6 \text{ V}$ .
- $I = 500 \text{ mA}$ .

Dělič napětí na sekundárním vinutí transformátoru byl vypočten tak, aby i při maximálním možném napětí sítě bylo na výstupu děliče mezivrcholové napětí pro měřící modul právě 1 V.

Povolená odchylka síťového efektivního napětí je  $230 \text{ V} \pm 10 \%$ , z čehož vyplývá, že na primárním vinutí transformátoru může být maximální efektivní hodnota síťového

napětí až 253 V, a na sekundárním vinutí maximální efektivní hodnota napětí 6,6 V. Maximální mezivrcholová hodnota sekundárního napětí.

$$6,6V * \sqrt{2} = 9,33 V \quad (4.9)$$

Je známo, že MTN je nejlépe provozovat ve stavu blízkému naprázdno, proto by měli být na odporový dělič použity rezistory s vysokými hodnotami odporu. Na druhé straně nesmí být hodnoty až tak vysoké, aby se na děliči neprojevovala vstupní impedance A/D převodníku. Dělič byl vypočten jako nezátížený se zanedbáním vstupní impedance A/D převodníku. Chyba, která se tak vnesla do měření, včetně rozptylu hodnot rezistorů v děliči, se vykompenzovala kalibrací.

Transformátor má maximální výstupní proud 500 mA, dělič byl zvolen tak, aby přes něj protékala setina proudu čili 5 mA. Celkový odpor děliče pro 5 mA je

$$R_{12} = \frac{U_{vstup}}{I_{vstup}} = \frac{9,33V}{0,005A} = 1866\Omega \cong 1,9 \text{ k}\Omega \quad (4.10)$$

Z celkového odporu děliče a maximální hodnoty vstupního a výstupního napětí byla vypočtena hodnota rezistoru  $R_1$ .

$$U_{vyst} = \frac{R_2}{R_1+R_2} U_{vstup} \Rightarrow R_2 = \frac{U_{vyst}*(R_1+R_2)}{U_{vstup}} = \frac{1V*1900\Omega}{9,33V} = 203,6 \Omega \quad (4.11)$$

Z celkového odporu děliče a hodnoty rezistoru  $R_2$  se vypočetla hodnota rezistoru  $R_1$ .

$$R_1 = R_{12} - R_2 = 1900\Omega - 203,6\Omega = 1696,4 \Omega \quad (4.12)$$

Rezistory byly zvoleny z odporové řady E24 pro  $R_1$  1800  $\Omega$  a pro  $R_2$  200  $\Omega$ . Po kontrolním přepočtu děliče s danými rezistory je na výstupu děliče 0,933 V při maximálním vstupním napětí 9,33 V.

Algoritmus vzorkování a výpočtu je rozebrán v části návrhu firmware.

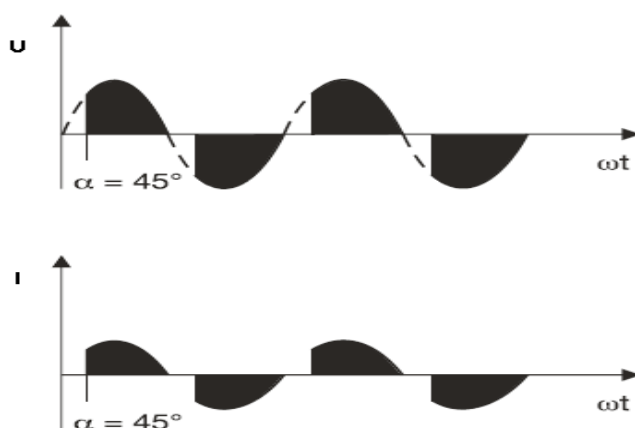
## 4.5 Návrh ovládání SSR

Při regulaci teploty jednotlivých zón je potřeba ovládat elektrický výkon topných těles na základě vypočtené akční veličiny. Zátěž má z hlediska dominantního chování v elektrickém obvodu rezistivní charakter, v drtivé většině reprezentována zařízeními přeměňujícími elektrickou energii na tepelnou (boilery, topná tělesa, přímotopy, atd.) a z hlediska spínání je tedy nejjednodušším typem zátěže.

Při regulaci výkonu pomocí SSR je třeba se rozhodnout jaký typ řízení použít. Pro potřeby daného zařízení se dají brát v úvahu dvě možnosti řízení výkonu, které pracují s periodou síťového napětí, přičemž ho nemění frekvenčně. Jedná se o fázové řízení, celovlnné, nebo půlvlnné řízení.

Fázové řízení:

Princip fázového řízení výkonu podle Obrázek 4.13 spočívá v úhlu otevření spínacího prvku, kdy je řízen okamžik připojení fázového napětí na zátěž. To znamená, že můžeme přímo nastavit bod na půlvlně, kdy přijde k sepnutí. Toto řízení má výhodu v jemnějším rozlišení regulace a používá se při regulaci výkonu rychle reagujících zátěží, jako jsou jas žárovky nebo třeba otáčky jednofázových komutátorových motorů apod. Velká nevýhoda tohoto řízení spočívá ve vyzářování vysokofrekvenčního (EMI) rušení způsobeného prudkou změnou proudu ve chvíli sepnutí  $di/dt$ , kdy je potřeba řešit problémy s následnou filtrací tohoto EMI rušení.



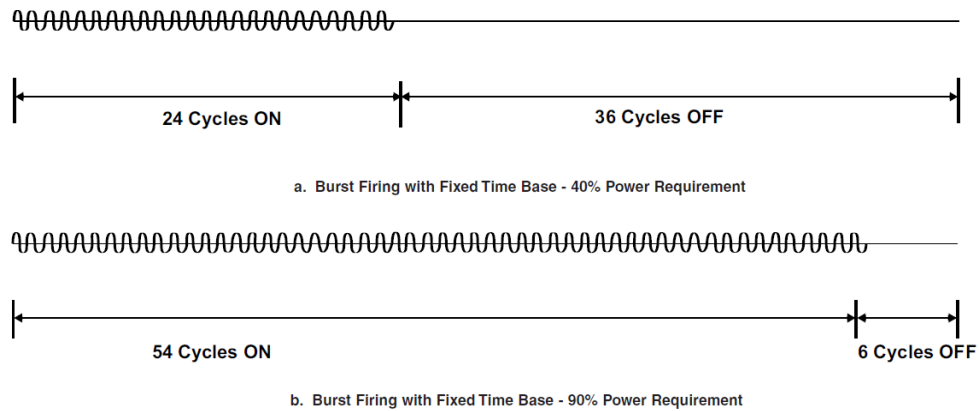
Obrázek 4.13 - Princip fázového řízení

Celovlnné řízení:

Použití celovlnného řízení není tak přesné jako fázové řízení, ale díky spínání v nule je eliminováno vysokofrekvenční rušení vnikající v důsledku rychlé změny  $di/dt$  fázového řízení. Díky práci s periodou (resp. půlperiodami) lze poměrně jednoduše řídit výkon dodávaný do zátěže. Ve chvíli sepnutí je okamžitá hodnota sinusového napětí nulová a napětí připojené k zátěži má na předem určeném pracovním úseku harmonický průběh. Tento druh ovládní výkonu se velmi dobře hodí pro regulaci teploty ryze ohmických zátěží, jako jsou ohřivače, pece, klimatizační komory a jiné. Velkou výhodou je i fakt, že dochází k minimálnímu generování rušivých harmonických frekvencí, které není potřeba filtrovat.

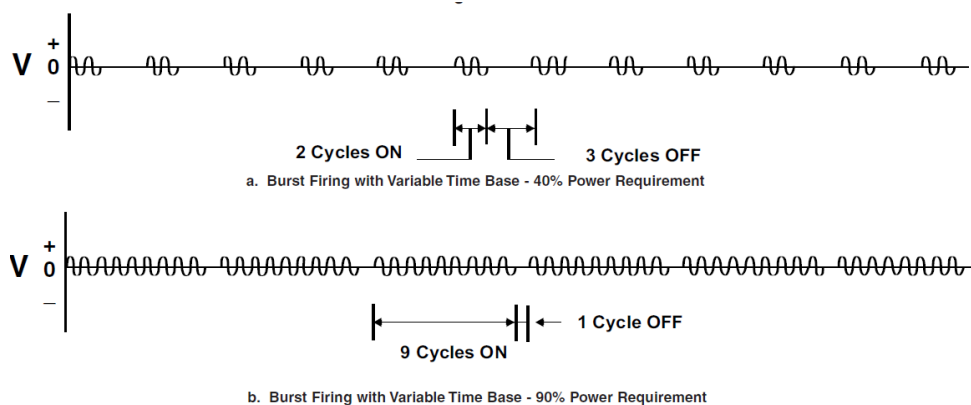
Při celovlnném řízení můžeme použít dva způsoby časování sepnutí, a to s pevnou časovou bází nebo s proměnnou časovou bází.

Princip řízení s pevnou časovou bází podle Obrázek 4.14 spočívá v tom, že si stanovíme pevnou časovou bází např. 1s a SSR svým sepnutím propustí určitý počet period do zátěže a část nepropustí v rámci zvolené časové báze. Počet period, které mají být propuštěny a které ne, je vypočten na základě žádaného výkonu (0-100 %).



**Obrázek 4.14 - Spínání s pevnou časovou bází [25] [26]**

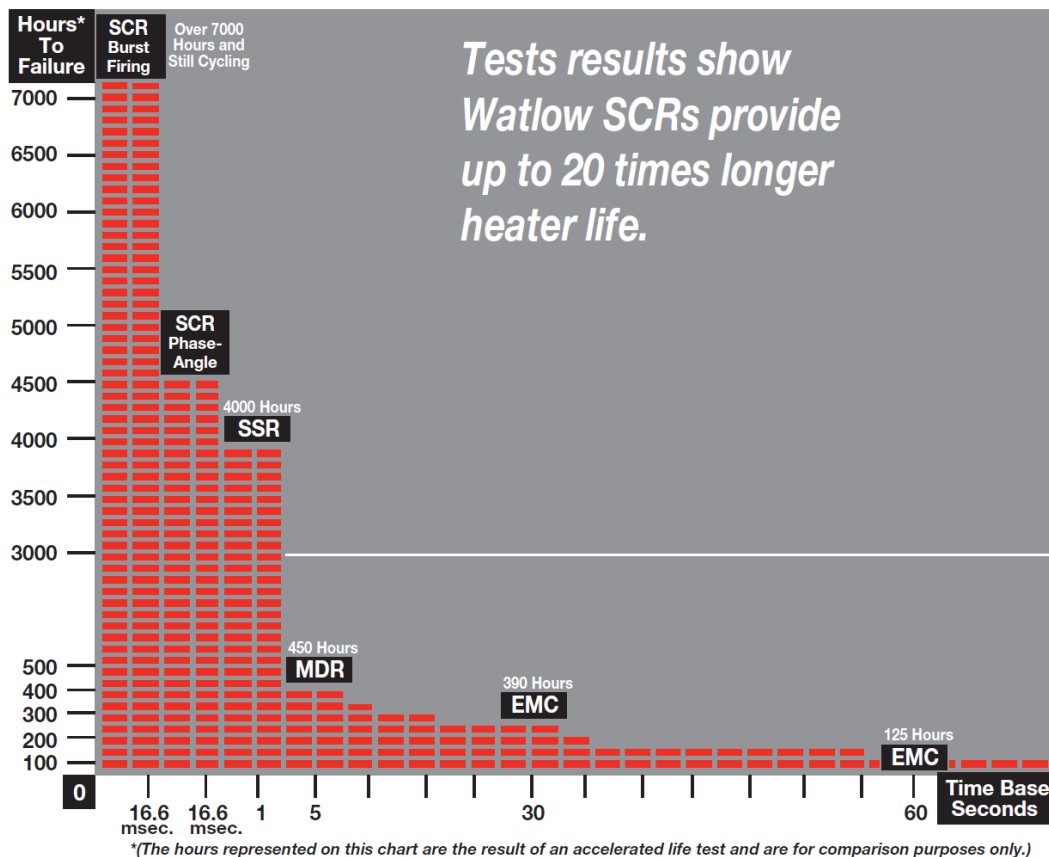
Řízení s proměnnou časovou bází podle Obrázek 4.15 je přímo odvozeno od předchozího, jen rozdíl je v tom, že periody, které mají být SSR-kem propuštěny do zátěže, se rovnoměrně rozloží do periody proměnné časové základny, která se upravuje tak, aby čas sepnutí byl co nejmenší.



**Obrázek 4.15 - Spínání s proměnlivou časovou bází [25] [26]**

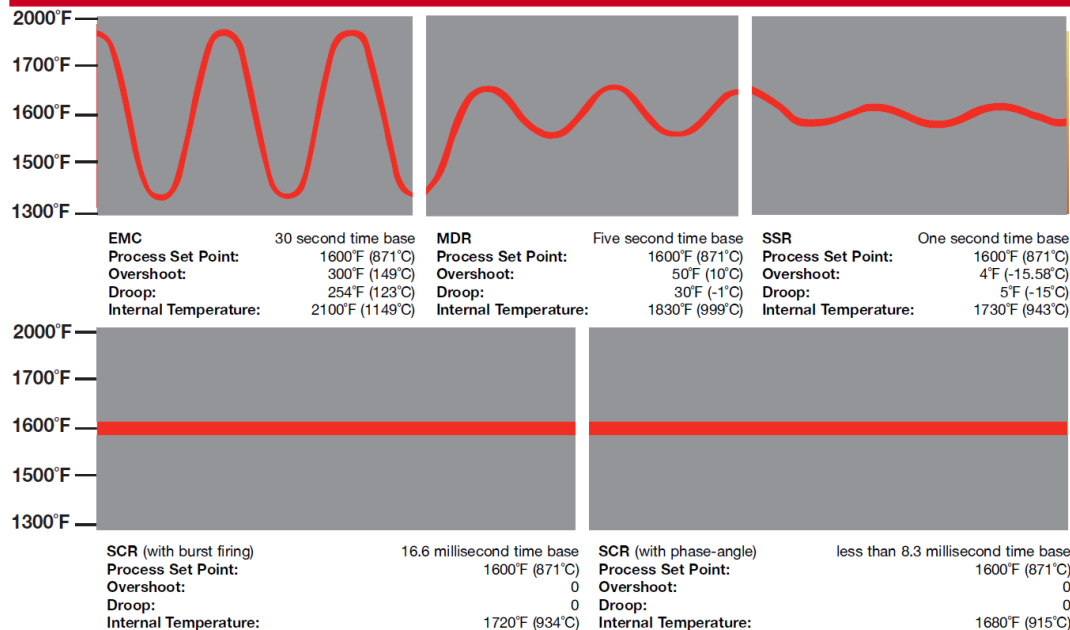
Toto řízení je ideální spínací metoda pro odporové zátěže a polovodičové výkonové spínače, umožňuje nejrychlejší možné spínání při průchodu proudu zátěží nulou. Výsledkem je jakostní regulace s minimálním elektromagnetickým rušením EMI. Vítaným vedlejším efektem je prodloužení životnosti topných těles, která nejsou zatěžována prudkými změnami vnitřní teploty. Názorně je to vidět na Obrázek 4.16 a 4.17, kde je porovnání životnosti topných těles při různém způsobu spínání a vliv spínacího režimu na tepelnou zátěž tělesa.

## Relationship: Heater Life vs. Time Base



**Obrázek 4.16 - Porovnání životnosti topných těles ve vztahu k časové bázi spínání [27]**

## Effect of Various Power Switching Time Bases on Temperature Excursion

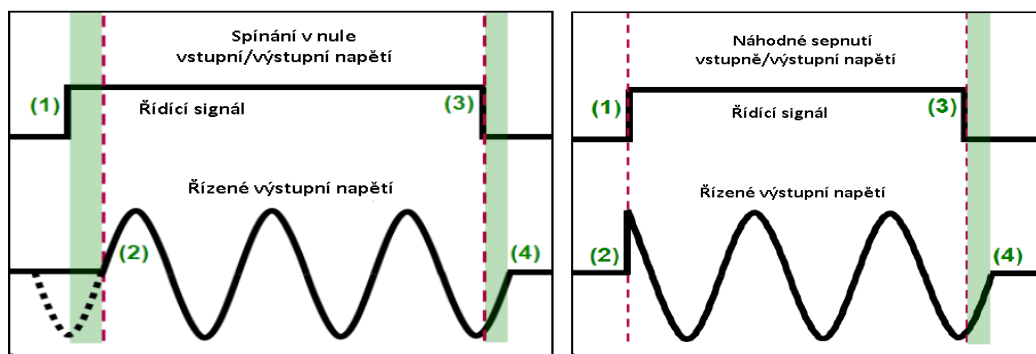


**Obrázek 4.17 - Vliv časové báze spínání na interní teplotu topných těles [27]**

Při návrhu výstupů měřicího modulu bylo nutné rozhodnout, jaký způsob spínání zvolit. Na základě předcházejícího textu bylo jednoznačně zvoleno celovlnné spínání SSR při průchodu nulou, přičemž se nabízí dvě možnosti ovládání výstupů měřicího modulu.

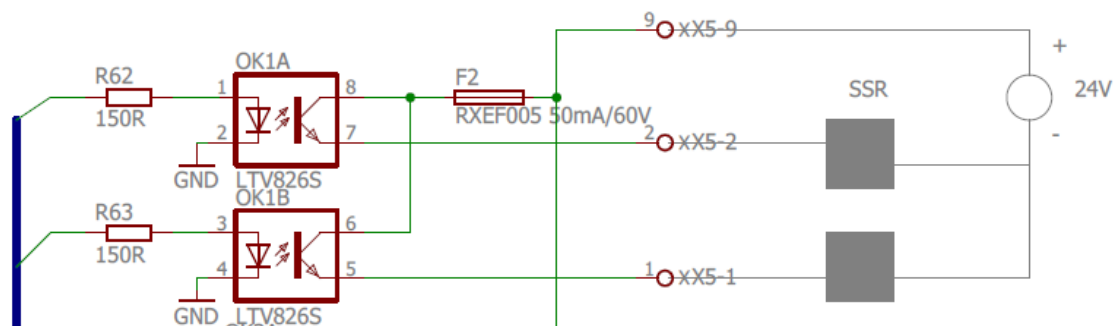
Při použití SSR s okamžitým sepnutím by se musel v měřicím modulu vyhodnocovat průchod síťového napětí nulou a při průchodu nulou vygenerovat řídicí impuls pro SSR. Toto řešení nese sebou komplikace (hardware, firmware), kterým se dá vyhnout použitím SSR, pracujícím se spínáním v nule. Každý výrobce SSR má v nabídce svých produktů oba typy spínání.

V případě použití SSR se spínáním v nule stačí na výstupu měřicího modulu generovat puls o době trvání jedné půlperrody, což je při 50 Hz 10 ms, nebo jeho celistvých násobků a tímto způsobem regulovat počet sepnutých půlperod síťového napětí viz Obrázek 4.18.



Obrázek 4.18 - Princip spínání SSR při průchodu nulou a náhodným spínáním

Na Obrázek 4.19 je konkrétní zapojení výstupů na měřicím modulu, kde je vidět jeden dvojitý optočlen ze čtyř, včetně dvou SSR a externího napájecího zdroje.



Obrázek 4.19 - Zapojení optočlenu pro spínání SSR

Většina výrobců vyrábí řídicí vstupy svých SSR s parametry pro sepnutí: 3-32 V a proudem menším než 10 mA. Jako výstupní prvek měřicího modulu byly vybrány optočlensky LTV826S [28], které svými základními parametry tranzistoru:  $U_{CEO} = 80$  V, kolektorový proud  $I_C = 50$  mA jsou schopné SSR-ka spínat.

Každá dvojice optočlenů je jištěna polovodičovou vratnou pojistkou 50 mA chránící výstupní tranzistory proti přetížení, současně umožňující průchod proudu pro dvě SSR 20 mA.

Vysílací dioda má parametry: proud v propustném směru  $I_F \text{ max.} = 50 \text{ mA}$ , napětí na diodě v propustném směru  $V_F = 1,2 \text{ V}$ . Každý výstup MCU může dodávat proud až 20 mA. Z převodní charakteristiky  $I_F-I_C$  v katalogovém listu optočlenu [28] bylo zjištěno, že kolektorový proud  $I_C = 22 \text{ mA}$  je schopen optočlen dosáhnout při proudu diodou  $I_F = 15 \text{ mA}$ . Proto se vypočetli předřadné odpory diody pro proud 15 mA, což je dostatečné pro sepnutí SSR a nebudou se tak výstupy MCU zbytečně zatěžovat jejich maximálním proudem.

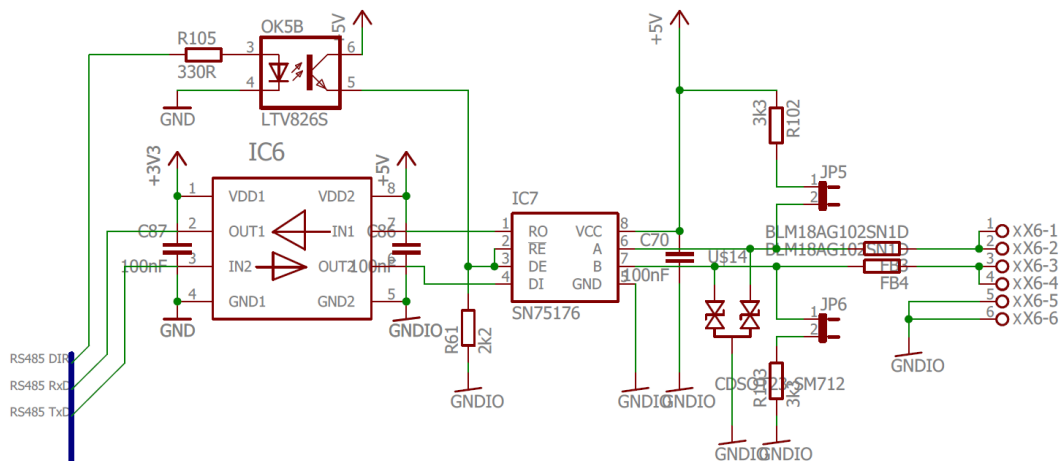
$$R = \frac{U_{pin} - U_f}{I_f} = \frac{3,3V - 1,2V}{0,015A} = 140 \Omega \quad (4.13)$$

Hodnota odporu  $R$  se vybrala  $150 \Omega$  z odporové řady E12, která je nejbližší vypočtené hodnotě  $140 \Omega$ .

Optočleny současně zajišťují galvanické oddělení spínání SSR od MCU a analogové části.

## 4.6 Návrh rozhraní RS485

Rozhraní RS485 podle Obrázek 4.20 je realizováno budičem SN75176A [29].



Obrázek 4.20 - Zapojení rozhraní RS485 na měřícím modulu

V zapojení jsou použity blokové kondenzátory umístěny co nejbližší k napájecím vývodům součástek. Na výstupu budiče sběrnice jsou použity EMI filtry v provedení feritových korálek, dále je použita ochrana proti napěťovým špičkám. Použitím propojek JP5 a JP6 lze připojit na linky rezistory, které na lince nastavují elektrický potenciál pro klidový stav.



Z důvodu, že jsou měřicí obvody termočlánků a MCU napájeny galvanicky odděleným napětím 3,3 V, byl vybrán oddělovač ADuM1200 [30], který zajišťuje galvanicky oddělený datový tok mezi MCU a RS485 a zároveň převádí napěťovou úroveň mezi 3,3 V a 5 V.

Poslední součástí v komunikačním rozhraní je optočlen LTV826S [28], který galvanicky odděluje výstup MCU od řízení směru přenosu dat. Přenos dat je stabilně přepnut na příjem a jen v případě potřeby vyslání zprávy na datovou linku je přepnut na vysílání. Vysílání a příjem je řízen na základě použitého komunikačního protokolu.

## 4.7 Návrh zdroje

Modul byl navržen pro stejnosměrné napájecí napětí 24 V, které je v průmyslu nejpoužívanější pro napájení prvků procesní automatizace. Pro zvolení správně dimenzovaného regulátoru napětí z 24 V na požadované stejnosměrné napětí použitých součástek 5 V a 3,3 V, bylo nutno vypočítat celkový proudový odběr všech součástek použitých na DPS. V úvahu byly brány maxima hodnot proudů, uvedená v katalogových listech výrobců použitých součástek.

označení	popis	počet	max. odběr [mA]	celkový odběr [mA]
ATxmega32A4	mikroprocesor	1	14	14
MCP3424	AD převodník	2	0,18	0,36
SN75176A	RS485 interface	1	50	50
ADUM1201	dvoukanálový oddělovač	1	2,2	2,2
DS18B20	senzor teploty	1	1,5	1,5
LTV826S	dvojité optočlen	5	40	200
BL-B2141-L	LED pro signalizaci	1	2	2
FTR-LYCA005V	jednopolové relé 5V	1	35	35
Součet				305,06

**Tabulka 12 - Proudová rozvaha odběru součástek na desce**

Z Tabulka 12 je zřejmé, že maximální odběr celého modulu je 305,06 mA. Minimálně na tento proud byl regulátor napětí dimenzován.

Regulátor napětí je aktivní prvek, který zajišťuje přeměnu napájecího napětí na nižší stabilizovanou velikost, potřebnou pro správnou funkci MCU a ostatních prvků měřicího modulu. Pro přeměnu stejnosměrného napájecího napětí 24 V na stejnosměrné stabilizované napětí 5 V a 3,3 V lze použít dva principy přeměny:

### 1) Lineární zdroje:

V lineárním napájecím zdroji je napájecí napětí přivedeno na lineární, většinou tří svorkový stabilizátor např. LM7805. [31] Výhoda lineárních zdrojů je především v tom, že nezpůsobují žádné vysokofrekvenční rušení. Proto se s výhodou používají především v audiotechnice, ale i v dalších odvětvích elektroniky. Nevýhoda lineárních stabilizátorů je v nižší účinnosti díky tepelným ztrátám způsobených faktem, že se chovají jako rezistor, který je umístěn sériově s napájením, a mění svou hodnotu tak, aby bylo na výstupu konstantní napětí. Napětí se tedy rozdělí mezi stabilizátor a výstup včetně výkonové ztráty, díky které je nutností používání velkých chladičů pro odvod ztrátového tepla.

### 2) Spínané zdroje:

Tyto napájecí zdroje pomocí speciálních integrovaných obvodů a spínacích tranzistorů pracují ve spínacím režimu o frekvenci v řádech kHz. Dále jsou použity vysokofrekvenční transformátor, usměrňovač a filtrační kondenzátory na výstupu zdroje. Stabilitu výstupního napětí zajišťuje zpětná vazba. Výhodou spínaných zdrojů je malá velikost, velký výkon a vysoká účinnost. Nevýhoda je především ve vysokofrekvenčním rušení, které musíme účinně filtrovat.

Při vývoji bylo potřebné rozhodnutí, kterou variantu napájecího zdroje použít. Ideální by byl lineární stabilizátor vzhledem k obvodové jednoduchosti, ale kvůli úspoře místa na DPS a malé uzavřené krabičce nelze použít chladič pro odvod ztrátového tepla.

Do úvahy připadal lineární regulátor LM7805, pro který se provedl výpočet na zjištění, zdali je schopen pracovat bez chladiče. Nejdůležitější katalogové údaje pro regulátor [31]: max. vstupní napětí 25 V, výstupní napětí 5 V, max. proud 1,5 A, povolená teplota čipu  $T_J = 125\text{ °C}$ , tepelný odpor mezi čipem a okolím bez chladiče  $R_{\theta JA} = 23\text{ °C/W}$ .

Výpočet ztrátového výkonu při maximálním odběru měřicího modulu

$$P_Z = (U_{IN} - U_{OUT}) * I_C = (24V - 5V) * 0,306A \cong 6\text{ W} \quad (4.14)$$

kde:

$P_Z$  – Ztrátový výkon [W]

$U_{IN}$  – Vstupní napětí do stabilizátoru [V]

$U_{OUT}$  – Výstupní napětí stabilizátoru [V]

$I_C$  – Celkový proud dodávaný stabilizátorem do obvodů [A]

Vypočtený ztrátový výkon 6 W byl porovnán s výkonem, který je schopen regulátor odvést do prostoru bez chladiče vypočten podle (4.15) převzatého z [31]

$$P_Z = \frac{T_J - T_A}{R_{\theta JA}} = \frac{125^\circ\text{C} - 30^\circ\text{C}}{23^\circ\text{C}/\text{W}} \cong 4 \text{ W} \quad (4.15)$$

kde:

$P_Z$  – ztrátový výkon [W]

$T_J$  – povolená teplota čipu přechodu [ $^\circ\text{C}$ ]

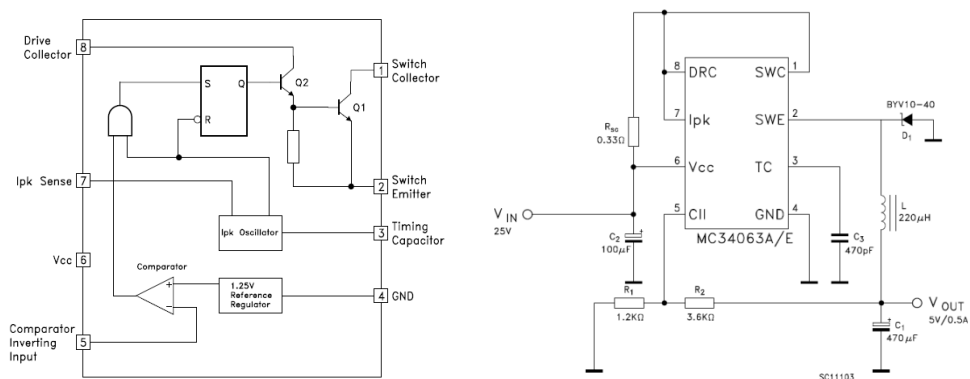
$T_A$  – teplota okolí v prostoru rozvaděče [ $^\circ\text{C}$ ] (počítáme s teplotou  $30^\circ\text{C}$ )

$R_{\theta JA}$  – tepelný odpor mezi čipem a okolním vzduchem [ $^\circ\text{C}/\text{W}$ ]

Výpočtem se zjistilo, že ani regulátor s nejnižším tepelným odporem mezi čipem a okolím  $R_{\theta JA}$  není schopen odvést všechno ztrátové teplo bez použití chladiče, proto padla volba na spínaný zdroj.

Vhodný jak malými rozměry, tak i požadovanými parametry je step-down regulátor MC34063 [32] s maximálním vstupním napájecím napětím  $V_{CC} = 50 \text{ V}$ , maximálním spínaným proudem  $I_{SW} = 1,5 \text{ A}$ , a nastavitelným výstupním napětím odporovým děličem ve zpětné vazbě.

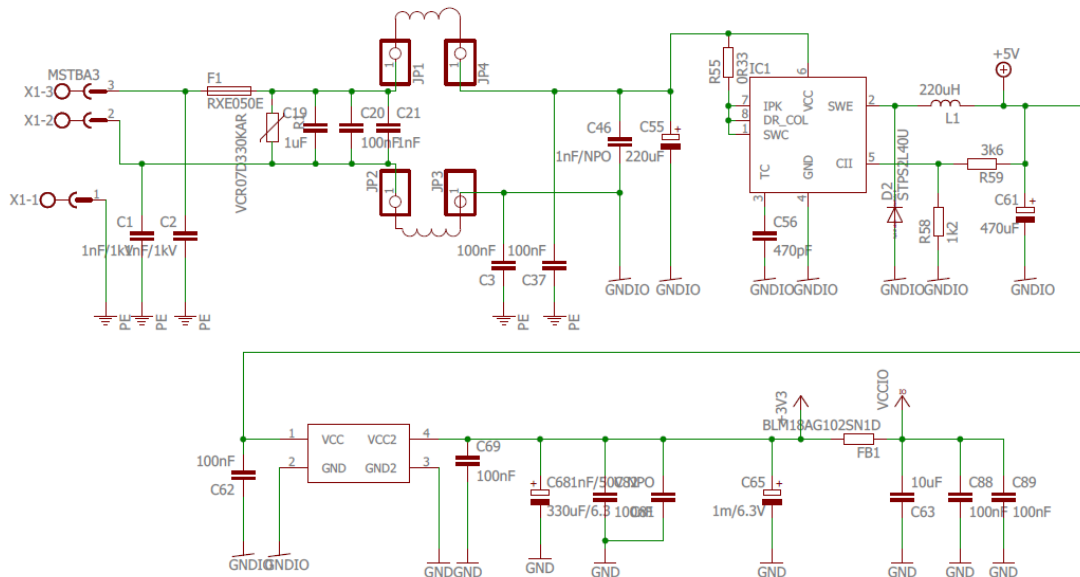
Zapojení zdroje i s hodnotami součástek byl přebrán z doporučeného zapojení výrobce podle Obrázek 4.21, kde vyhovují jak vstupní napětí  $25 \text{ V}$ , tak i výstupní napětí  $5 \text{ V}$  včetně výstupního proudu  $0,5 \text{ A}$ .



**Obrázek 4.21 - Katalogové zapojení step-down regulátoru MC34063 [32]**

Na Obrázek 4.22 je zapojení zdrojové části řešeného měřicího modulu. Pro jistění proti nadproudu je použita vratná pojistka odpojující při proudu větším než  $0,5 \text{ A}$ , a pro ochranu proti přepětí je použit varistor. Kondenzátor  $1 \text{ nF}$  musí být umístěn co nejbližší k MC34063 a slouží především k tomu, aby celé zapojení neprodukovalo silné rušení na přívodu pozorovatelné v pásmu  $70$  až  $120 \text{ MHz}$ . Kondenzátor  $470 \text{ pF}$  slouží k nastavení pracovní frekvence oscilátoru uvnitř MC34063. Rezistor  $R_{55} 0,33 \Omega$  omezuje maximální výstupní proud na  $500 \text{ mA}$ , záměnou za  $0,22 \Omega$  lze dosáhnout omezení proudu na  $680 \text{ mA}$ . Rezistory  $R_{59} = 3,6 \text{ k}\Omega$  a  $R_{58} = 1,2 \text{ k}\Omega$  dělí výstupní napětí tak, aby do vývodu 5 na MC34063 přicházelo  $1,25 \text{ V}$ , což je hodnota interní napěťové reference použité u komparátoru.  $(1,25\text{V}/1200\Omega) \cdot (3600\Omega + 1200\Omega) = 5 \text{ V}$ .

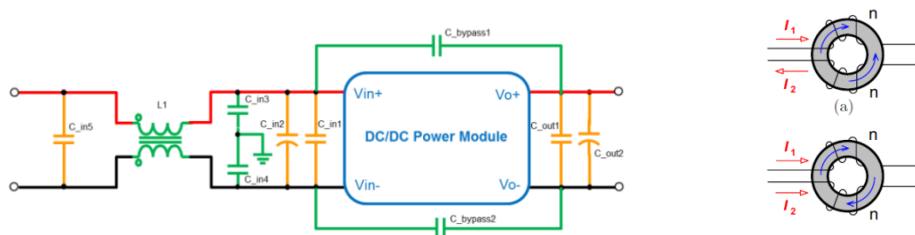
Kondenzátor C61 = 470  $\mu$ F na výstupu slouží k filtraci výstupního napětí 5 V.



Obrázek 4.22 - Schéma zapojení zdrojové části měřicího modulu

Zdroj 5 V není galvanicky oddělen, slouží pro napájení miniaturního relé a komunikačních obvodů rozhraní RS485. Z tohoto napětí je dále pomocí DC-DC měniče TME0503S [41] odvozeno galvanicky oddělené napájení 3,3 V pro MCU a A/D převodníky měření termočlánků. TME0503S má výstupní proud 260 mA což je při maximálním odběru součástek 219 mA na hladině 3,3 V dostačující.

Na vstupu napájení je ještě použita tlumivka s proudovou kompenzací pro potlačení nesymetrické složky rušení v napájecích obvodech [33]. Princip této tlumivky na Obrázek 4.23 spočívá v tom, že přívodní vodiče jsou navinuty na společném jádru ve stejném smyslu tak, že pro pracovní proud a pro protifázové proudy mají jejich magnetické toky opačný směr, vzájemně se ruší a výsledná indukčnost pro pracovní proud je téměř nulová. Pro soufázové rušivé proudy obou vodičů (tedy pro rušivé proudy protékající oběma vodiči ve stejném směru) mají magnetické toky souhlasný směr, takže efektivní indukčnost pro tyto proudy je značná. Přitom zde nedochází ani k přesycení jádra, ani k úbytku napětí v obvodu pracovního proudu.



Obrázek 4.23 - Princip filtrační tlumivky na vstupu měřicího modulu [33]

## 4.8 Návrh desky plošných spojů

Pro zabudování měřicího modulu podle požadavku kapitoly 3 byla vybrána krabička Railbox 17.5 dodávaná firmou TME, která je určena pro průmyslové použití s montáží na DIN lištu a umožňuje umístění desky s plošnými spoji o rozměrech 77 x 104mm.



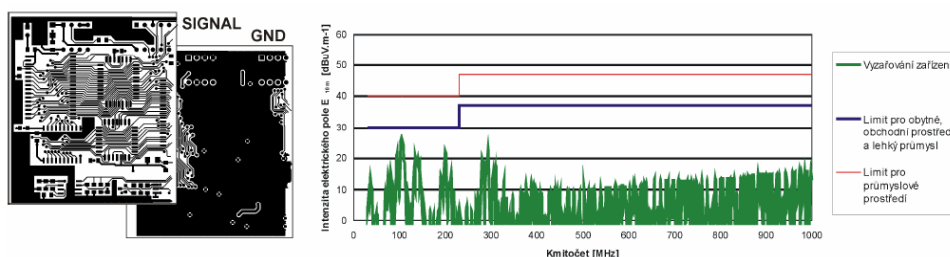
**Obrázek 4.24 - Krabička Railbox pro měřicí modul**

Návrh DPS je jedna z nejsložitějších částí projektování elektronického systému. Při návrhu je třeba myslet na množství různých aspektů, ke kterým například patří:

- Správné a spolehlivé fungování systému.
- Dodržení zásad EMC.
- Estetický design.

Měřicí modul byl realizován na jedné dvojvrstvé DPS, která byla navržena v programu Eagle firmy CadSoft. Při návrhu byly zohledněny principy a pravidla návrhu dle [34] [35] [36]. Spodní strana desky je téměř celá pokryta plochou mědi vodivě spojené se zemí. Tato plocha je rozdělena izolačním příkopem, odděluje tak analogovou část zařízení od komunikační a zdrojové části, které jsou galvanicky odděleny. Důvodem rozdělení je, aby zpětný proud digitální části neprotékal přes analogovou zemi a naopak. Jinak můžou vzniknout nežádoucí šумы, co ovlivní správnou funkci systému. Analogová a digitální zem je propojená co nejbližší u napájecího zdroje. Plocha rozlité mědi je přerušována ostatními signálními vodiči v minimální možné míře. Téměř všechny signálové a napájecí spoje jsou realizovány z druhé strany (strany součástek). Pro propojení země mezi oběma vrstvami jsou použity prokovy rozmístěné po celé ploše desky. Spoje se slabými a silnými signály jsou taženy v dostatečné vzdálenosti od sebe. Plochy proudových smyček jsou minimalizovány. Vodiče nejsou spojovány pod ostrými úhly, přičemž v sousedních

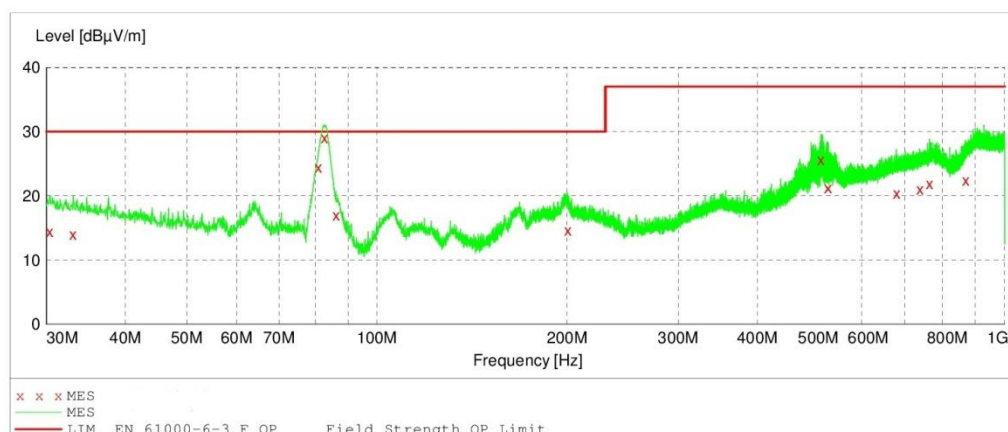
vrstvách jsou orientovány kolmo na sebe pro minimalizaci indukčních a kapacitních vazeb. V bezprostřední blízkosti napájecích vývodů každého integrovaného obvodu je umístěn vhodný blokovací kondenzátor, pokrývající náhlý proudový odběr, čímž se eliminuje vliv parazitních indukčností přívodních spojů. Zařízení bez použitých blokovacích kondenzátorů většinou není schopné správné funkce, co se projevuje nepřipustným zvlněním napájecího napětí, hazardními stavy číslicových obvodů, nadměrným šumem a sklonem ke kmitání u analogových obvodů. Zpravidla se používají elektrolytické kondenzátory, ke kterým se připojují paralelně keramické kondenzátory



**Obrázek 4.25 - Kvalifikovaný návrh na 2-stranné DPS podle [35]**

Na Obrázek 4.25 je ilustrativní návrh DPS podle platných pravidel včetně výsledků měření EMI z [35].

Na Obrázek 4.26 je skutečně změřený průběh EMI na osazeném a oživeném měřicím modulu autorizovanou zkušebnou. Z výsledku měření je vidět, že v jednom místě rušení nepatrně překročí hranici pro obytné prostory, ale v celém rozsahu měření jsme pod hranicí pro průmyslová zařízení. Proto můžeme měřicí modul z hlediska EMI považovat za vyhovující pro průmyslové prostředí což je i vyjádření zkušebny.



**Obrázek 4.26 - Průběh měření EMI měřicího modulu**

Elektrické schéma a navřená deska plošných spojů jsou uvedeny v Příloha 1.

## 5 IMPLEMENTACE FIRMWARE MĚŘÍČÍHO MODULU

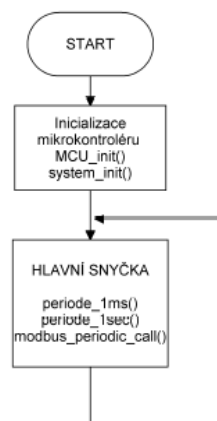
Softwarové vybavení (firmware) MCU ATxmega bylo kompletně vytvořeno a odladěno ve vývojovém prostředí ATMEL AVR Studio 7. K programování procesoru byl využit USB programátor JTAG ICE Mk2.

Firmware se skládá z několika zdrojových souborů (modulů) naspaných v jazyce C, kde každý realizuje konkrétní funkce. Takové rozčlenění umožňuje lepší přehlednost a orientaci v celém projektu.

Po inicializaci MCU je v kontextu funkce *main* vykonávána hlavní smyčka, ve které jsou cyklicky testovány jednotlivé stavové proměnné aplikace. Tyto proměnné jsou definovány jako globální a jejich stavy jsou většinou měněny v obslužných rutinách přerušení. Tímto mechanismem je v hlavní programové smyčce signalizováno, že došlo k nějaké události, na kterou je třeba zareagovat. Podle nastavené stavové proměnné je pak vykonána konkrétní reakce.

Výhoda tohoto systému je v tom, že obslužné rutiny přerušení jsou velmi krátké a nezabírají strojový čas procesoru. V jejich obsluze se vykonávají pouze nezbytné operace související s přerušením a nastavení příslušné stavové proměnné. Samotná reakce na danou událost může být náročnější na strojový čas a proto je vykonána v kontextu hlavní programové smyčky.

Další výhodou je, že v době kdy hlavní smyčka vykonává patřičnou reakci, je povoleno přerušení a mohou tak být zaznamenány další události. Nevýhodou tohoto systému může být to, že reakce jsou prováděny v čase postupně bez stanovení priorit jejich obsluhy. Touto nevýhodou se nemusíme zabývat, protože žádná obsluha události měřícího modulu není závislá na události jiné.



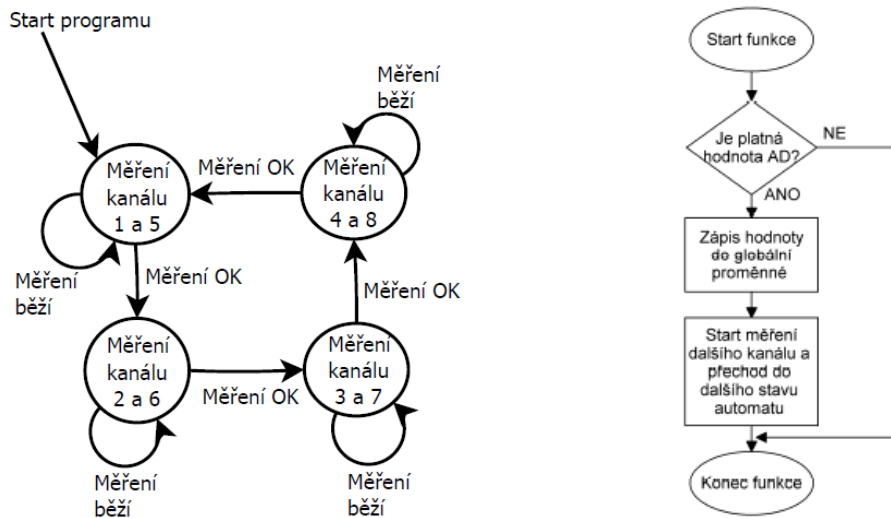
Obrázek 5.1 - Hlavní smyčka programu

## 5.1 Měření termočlánků

Obvod MCP3424 má možnost práce ve dvou režimech a to kontinuální mód nebo jednorázové čtení. V měřícím modulu se využívá režim jednorázového čtení, kdy se periodicky ve 100 ms intervalech volá funkce `cti_termoclanky()`, která se chová jako stavový automat. Ve stavovém automatu se při každém zavolání provede test konce převodu A/D hodnoty, v případě že převod ještě není ukončen, funkce se opustí. Při kladném testu na přítomnost platné hodnoty se hodnota vyčte z převodníku a uloží do příslušné globální proměnné (vstupního Modbus registru).

V daném stavu se ještě aktivuje měření na dalším kanálu a stavový automat přejde do následujícího stavu. Tady opět při periodickém volání vyčkává na platnou hodnotu A/D převodníku podle Obrázek 5.2.

Z důvodu, že se používají dva A/D převodníky, se ve stavovém automatu v každém stavu testují a spouští oba převodníky najednou. Hodnoty A/D převodu jednotlivých kanálů jsou ukládány do vstupních Modbus registrů v celočíselném 32 bitovém formátu se znaménkem. Přepoččet A/D hodnoty na teplotu a linearizace se provádí v PC programu.



Obrázek 5.2 - Stavový automat a jeho funkce ve stavech pro čtení MCP4324

Komunikace s obvody MCP3424 probíhá po sběrnici I<sup>2</sup>C, k čemuž jsou využívány funkce poskytované vývojovým prostředím AVR Studio.

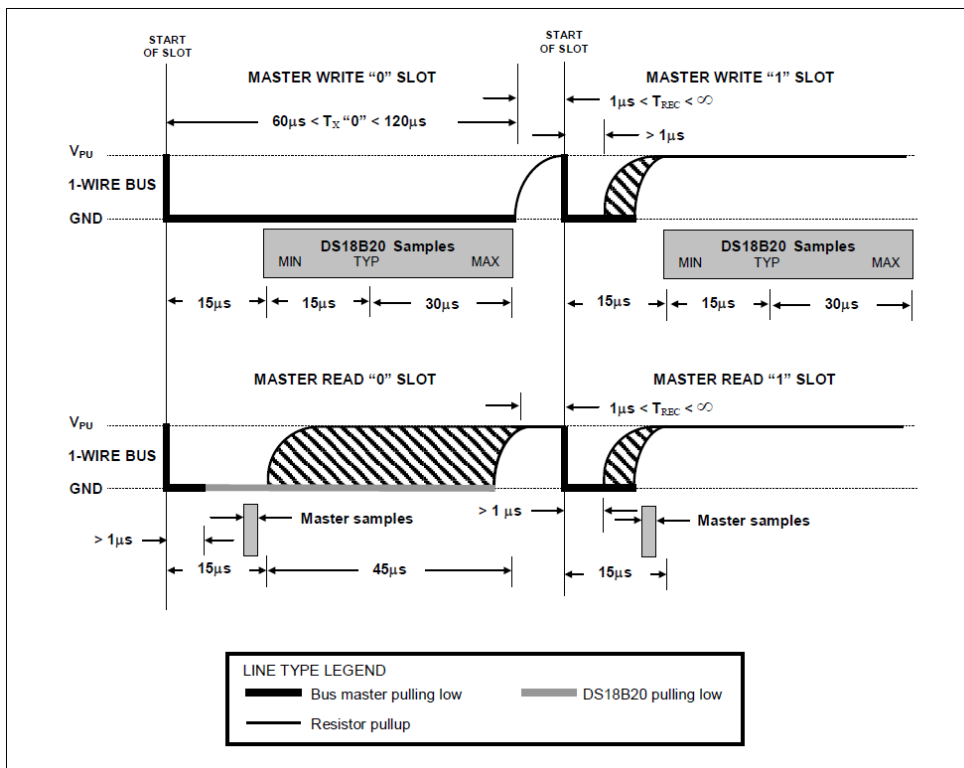
## 5.2 Měření teploty izotermické svorkovnice

Použitý MCU neobsahuje řadič pro 1-Wire sběrnici [19], proto byla komunikace naprogramována.



Senzor DS18B20 [19] je používán v konfiguraci s 12 bitovým rozlišením, kdy dosahuje rozlišení teploty 0,0625 °C s dobou převodu 750 ms. Z tohoto důvodu se v sekundovém intervalu volá funkce *Cti\_Dallas()*, která využívá funkce modulu *onewire.c*.

Sběrnice 1-Wire navržená firmou Dallas Semiconductor umožňuje připojit několik zařízení k řídicí jednotce prostřednictvím pouhých dvou vodičů. Sběrnice má jeden řídicí obvod (master) a jeden nebo více ovládaných zařízení (slave). Komunikaci zahajuje vždy master inicializační sekvencí. Inicializační sekvence začíná reset pulsem, který provádí funkce *ow\_reset()*. Nejprve nastaví datový vodič do log. 0 a drží ho na této úrovni minimálně 480 μs. Pak sběrnici uvolní a naslouchá. Odpor zatím vrátí sběrnici zpět do log. 1. Pokud je na sběrnici připojené nějaké 1-Wire zařízení, tak detekuje tuto vzestupnou hranu a po prodlevě 15 až 60 μs nastaví sběrnici log. 0 na 60 až 240 μs. Pokud se zařízení správně ohlásí, může master začít vysílat a přijímat data. Data jsou vysílána v časových slotech, jeden slot je dlouhý 60 až 120 μs a během jednoho slotu je vyslán nebo přijat jeden bit informace k čemu slouží funkce *ow\_bit\_io*. Mezi jednotlivými sloty musí být minimálně 1 μs pauza, kdy je sběrnice v klidu. Funkce *ow\_bit\_io* je použita ve funkcích pro čtení/zápis bajtu *ow\_byte\_rd* a *ow\_byte\_wr*, kde je každý bajt zapsán nebo načten ve smyčce 8x volající funkci *ow\_bit\_io*. Funkce *crc8* slouží na výpočet kontrolního součtu, který obsahují stahované data.



Obrázek 5.3 - Čtecí a zápisový časový diagram [19]

Jelikož je použito pouze jedno čidlo DS18B20, nepoužívá se příkaz ROM, který slouží k identifikaci čidla. Přeskakuje se příkazem `OW_SKIP_ROM` a neztrácí se tak strojový čas zbytečnou komunikací při identifikaci čidla.

### 5.3 Měření napětí RMS

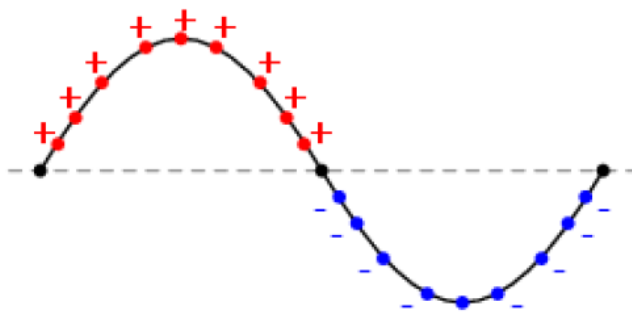
V programu je vytvořena struktura `TRMS_t`, ze které je vytvořeno pole jako globální proměnná o délce 3 položek pro tři vstupní kanály. Ve struktuře se uchovávají stavy řídicích proměnných a všechny mezivýsledky jednotlivých kanálů.

Měřicí modul má tři analogové vstupy, které jsou multiplexovány na jeden A/D převodník. První ideou bylo vzorkovat všechny tři vstupy tak, že po každém vzorku by přišlo k přepnutí na další vstup a tímto způsobem by se sbírali vzorky postupně ze všech tří kanálů. Toto řešení se při testování ukázalo jako nevhodné, protože docházelo k velké nestabilitě vypočtených hodnot.

Jako vhodné stabilní řešení se ukázalo měření, kdy se navzorkuje nejdřív jedna celá perioda jednoho vstupu, provede se výpočet a pak se přepne na další vstup. Jak bylo definováno v kapitole 4.4, probíhá vzorkování vstupního signálu s periodou 200  $\mu\text{s}$ .

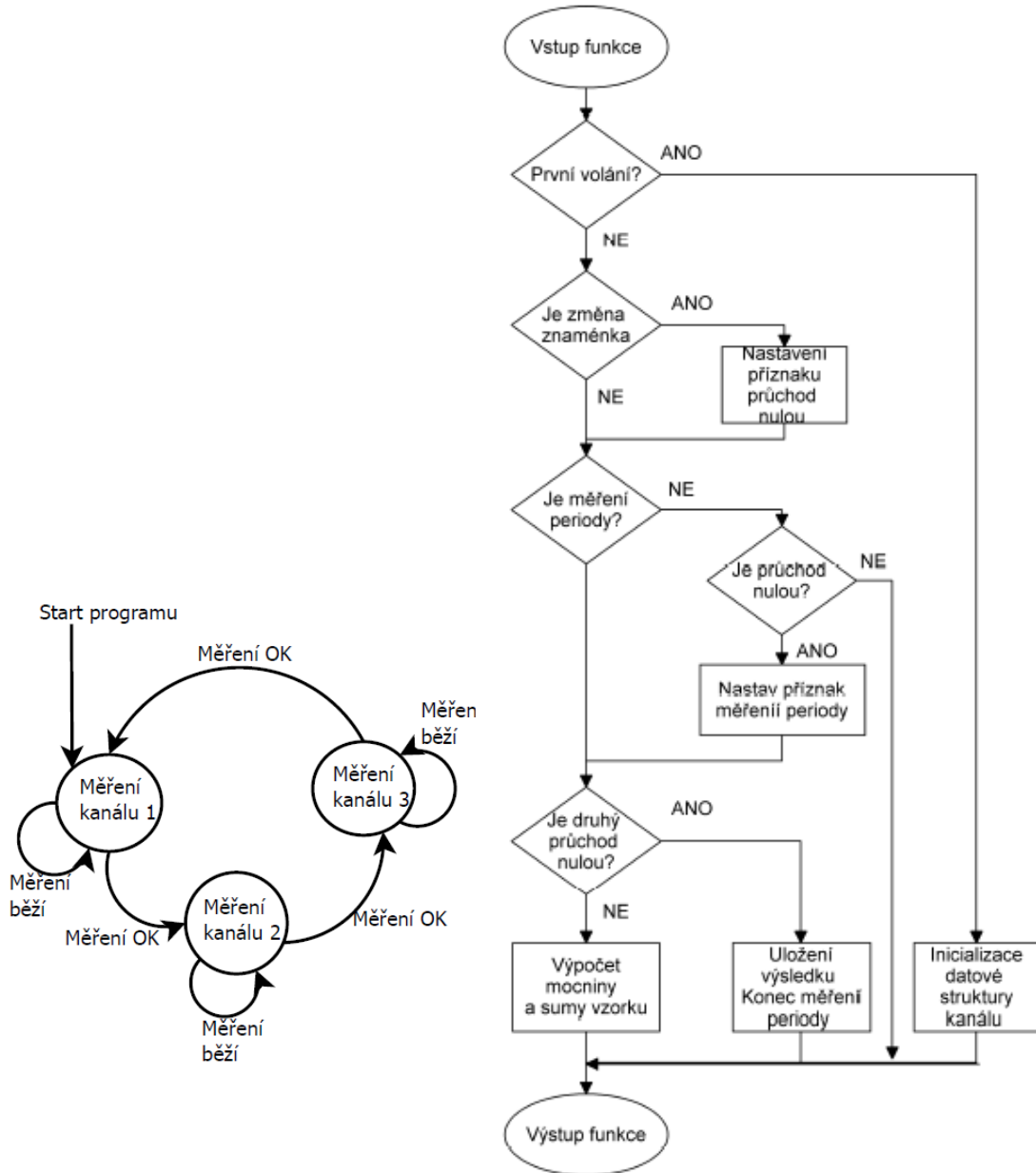
Algoritmus pracuje tak, že nejdřív zjistí průchod nulou při změně polarity vzorkovaného signálu Obrázek 5.4. Od této chvíle sbírá vzorky se současným výpočtem druhé mocniny a sumy, až do chvíle druhého průchodu nulou od startu algoritmu, kdy se provedený výpočet mocnin a sumy vzorků uloží do výstupního registru.

Přesné časování vzorkování se ukázalo jako stěžejní, proto se používá samostatný časovač, v jehož přerušení se volá obslužná funkce `ADC_Read`. Tato funkce je stavový automat Obrázek 5.5, který při vyvolání vybere hodnotu z A/D převodníku, tuto předá funkci `RMS_zpracovani_hodnoty` včetně ukazatele na datovou strukturu měřeného kanálu. Funkce `RMS_zpracovani_hodnoty` po ukončení vzorkování celé periody vrátí návratovou hodnotu log. 1 a stavový automat přejde do dalšího stavu.



Obrázek 5.4 - Vzorkování periody vstupního signálu

Pro lepší stabilitu výsledků měření jsou vypočtené hodnoty filtrovány plovoucím průměrem, kdy se vypočítává aritmetický průměr z několika posledních hodnot, jejichž množství lze nastavit velikostí FIFO zásobníku.



Obrázek 5.5 - Stavový automat pro čtení kanálů v MCU a vývojový diagram funkce stavů

## 5.4 Komunikace Modbus

Pro přijímané a odesílané znaky jsou deklarovány pole o 256 položkách typu char. Tato velikost je plně dostačující pro RTU režim, kde je maximální počet přijatých či odesílaných znaků právě 256. Pro komunikaci s měřicími moduly je použit RTU mód, ASCII mód není implementován. Při inicializaci MCU je nastavena sériová linka do módu: 1 start bit, 8 datových bitů, 1 paritní bit a jeden stop bit (tedy 11 bitový formát). Dále je spuštěn časovač TCD0, sloužící pro odměřování doby trvání pomlky na sběrnici 1,5 a 3,5 násobku znaku (t1.5 a t3.5).

### 5.4.1 Obsluha přerušení od sériové linky při příjmu bajtu

Při každém přijetí bajtu do UART registru je vyvoláno přerušení, které ve své obslužné funkci přijatý bajt ukládá do pole přijatých znaků. Po uložení znaku se provede vynulování čítačů délky intervalu t1.5 a t3.5, a zkontroluje se příznak kontroly parity, kdy se v případě zlé parity inkrementuje čítač chybných znaků.

### 5.4.2 Měření časového intervalu t1.5 a t3.5

Režim RTU vychází při vysílání zprávy z časových intervalů t1.5 a t3.5 doby trvání jednoho znaku. První z této dvojice definuje maximální interval mezi jednotlivými slovy zprávy při příjmu, kdy po jeho doběhnutí je zároveň program schopen přejít ke kontrole zprávy. Interval t3.5 definuje časovou prodlevu mezi příjmem dvou odlišných zpráv. Určuje úsek, po kterém může zařízení odpovědět, nebo čekat na další událost. Pro nejrychlejší přenos 115200 Bd je jeden bit vyslán za  $1/115200 \text{ s} = 8,7 \mu\text{s}$  a pro vyslání jednoho bajtu při 11 bitovém formátu je potřeba 95  $\mu\text{s}$ . Pro odměřování t1.5 a t3.5 doby trvání jednoho znaku slouží funkce *periodic\_call()*, ve které se provádí inkrementace čítačů a porovnání s vypočteným počtem inkrementů pro danou přenosovou rychlost. Po dosažení vypočteného stavu funkce nastaví příznak uběhnutí času t1.5 nebo t3.5. Pro dostatečně přesné odměřování časů i pro nejvyšší komunikační rychlost je funkce volána v přerušení od časovače TCD0 každých 10  $\mu\text{s}$ . Pro přepočet požadovaných stavů čítačů pro všechny přenosové rychlosti slouží funkce *vypocet\_15\_35t()*, která pro vybranou přenosovou rychlost vypočte požadovaný stav čítačů při periodickém volání funkce 10  $\mu\text{s}$ .

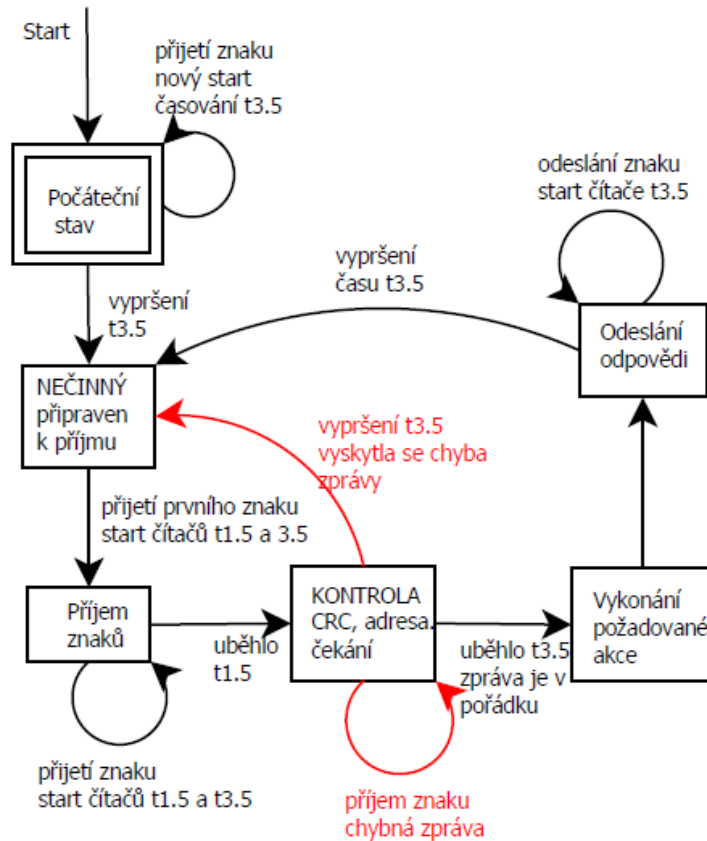
### 5.4.3 Přepínání směru toku dat pro RS485

Rozhraní RS485 je poloduplexní, proto se musí řídit směr toku dat. Řízení je zajištěno softwarovým nastavováním portu PD1 na log. 0 nebo na log. 1. Hodnota portu je po restartu nastavena na log. 0, je tedy možné přijímat data přes RS485. Před každým odesláním dat je port přepnut na log. 1, směr komunikace je nastaven na odesílání dat a po odeslání posledního znaku následovaného prodlevou t3.5 délky znaku je opět

přepnut na log. 0 (režim příjmu dat). Pro přepínání směru toku dat jsou používány dvě funkce *RS485\_1\_RXmode()* a *RS485\_1\_TXmode()*.

### 5.4.4 Příjem a zpracování zprávy

Příjem a zpracování zprávy má na starosti funkce *modbus\_periodic\_call()*, pracující jako stavový automat podle Obrázek 5.6, která je volána přímo z hlavní funkce *main()*.



Obrázek 5.6 - Stavový diagram Modbus RTU

Počáteční stav:

Měřicí modul je po zapnutí v počátečním stavu minimálně po dobu trvání příjmu t3.5 znaku. Pokud je přijat během této doby nějaký znak, je počítání času t3.5 znaku restartováno. Po uplynutí času přechází modul do stavu „nečinný“.

Stav „Nečinný“:

V tomto stavu je nastavován režim přenosu na příjem, jsou zde nulovány některé proměnné a čeká se na příjem znaku.

Stav „Příjem znaků“:

Do tohoto stavu přejde automat po příchodu prvního znaku. Zde probíhá příjem celé zprávy a čeká se na příznak uběhnutí času  $t_{1.5}$  znaku. Jakmile tento čas vyprší, považujeme zprávu za přijatou a automat přechází do kontroly CRC a čekání.

Stav „Kontrola a čekání“:

V tomto stavu se čeká na uplynutí času  $t_{3.5}$  znaku a současně se kontroluje příchod znaku. V případě, že během čekání přijde znak, považuje se zpráva za chybnou, automat přejde do stavu „nečinný“.

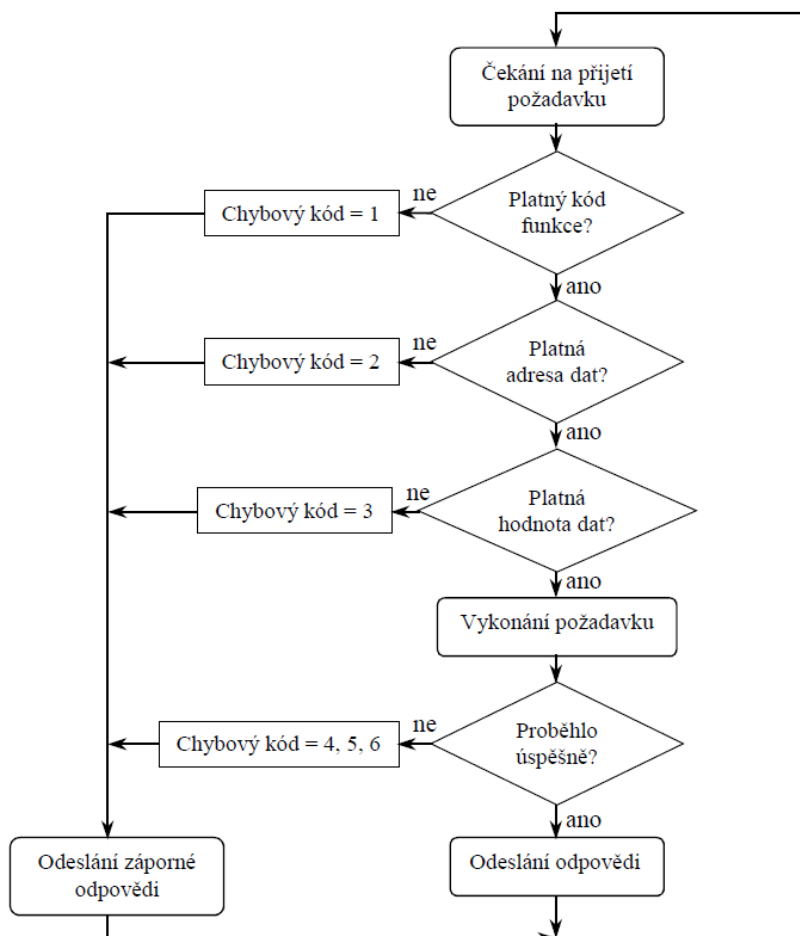
Po dosažení času  $t_{3.5}$  znaku je provedena kontrola CRC a porovnána adresa ve zprávě, jestli je zpráva adresována tomuto modulu, nebo jestli se jedná o broadcast. Jestliže je během jakékoliv kontroly nalezena chyba (včetně ověření parity), přechází jednotka do stavu „nečinný“. Proběhne-li kontrola bez chyb a zpráva je určena danému modulu, modul začne vykonávat požadovanou akci přechodem do stavu „vykonání akce“. V opačném případě přechází do stavu „nečinný“.

Stav „Vykonání akce“:

Ve stavu se vyhodnotí, zdali se provádí požadavek přímo adresované jednotce, nebo broadcast požadavek a tomu se volají příslušné obslužné funkce. Zpracování probíhá podle diagramu na Obrázek 5.7. Při provádění přímo adresovaného požadavku se připravuje odpověď mastrovi. Prvním odesílaným znakem je u jakékoliv odpovědi adresa modulu. Podle přijatého kódu funkce je vykonán příslušný požadavek. Pokud jednotka funkci nezná je odesílána záporná odpověď s chybovým kódem č. 1 (ilegální funkce). U funkcí podporovaných měřícím modulem je kontrolováno, jestli odpovídá délka přijaté zprávy délce uvedené v popisu funkce podle Modbus protokolu. Jsou-li délky rozdílné, je odesílána záporná odpověď s chybovým kódem č. 3 (ilegální hodnota dat). Poté je zjišťováno, jestli se nachází adresa dat v definovaném rozsahu. Pokud není adresa platná, odesílá se záporná odpověď s chybovým kódem č. 2 (ilegální adresa dat). Na poslední a předposlední místo v odesílané zprávě je uloženo vypočtené CRC. Po vložení CRC je již celá zpráva zpracována, připravena k odeslání a automat přejde do stavu „odeslání odpovědi“. Po provedení broadcast požadavku se odpověď nepřipravuje, automat přechází do stavu „nečinný“.

Stav „Odeslání odpovědi“:

V tomto stavu se funkcí *RS485\_I\_TXmode()* přepne rozhraní na vysílací režim a jsou postupně odesílány všechny znaky zprávy. Detekce odeslané zprávy je realizována pomocí časování doby trvání  $t_{3.5}$  znaku. Jakmile tento čas vyprší, je celá odpověď odeslána a modul přechází do stavu „nečinný“.



Obrázek 5.7 - Postup zpracování Modbus požadavku [6]

Při zpracování požadavku jsou inkrementovány chybové čítače CPT1-CPT8 podle algoritmu z obrázku 5.7.

### 5.4.5 Funkce pro výpočet CRC

Pro výpočet CRC je použita funkce `crc_calculate()`. Na začátku funkce se nahraje do proměnné `result` hodnota `0xFFFF`, v dalším kroku porovnáme proměnnou `result` pomocí nonekvivalence s bytem obsaženým ve zprávě. Proměnná `i`, která určuje cyklus pro zpracování 1 bajtu, se nastaví na nulu. Poté dojde u CRC k bitovému posuvu doprava. Zkontroluje se, zda pravý bit, o který jsme posuvem přišli, byla jednička. Jestliže ne, přejdeme na inkrementaci proměnné `i`, pokud ano, projde CRC nonekvivalencí s konstantou `0xA001` a teprve poté se `i` inkrementuje. Následuje kontrola, jestli se nacházíme na konci bajtu. Při kladné odpovědi se program přesune před operaci posuvu doprava. Při záporné dojde ke kontrole, zda jsme dosáhli konce celé zprávy. Pokud ne, vrátíme se ke kroku, kdy se provádí nonekvivalence CRC s dalším bajtem zprávy. Pokud dojdeme na konec zprávy, funkce ukončí svou činnost a v proměnné `result` se v tu chvíli bude nacházet finální tvar CRC pro danou zprávu.

## 5.4.6 Podporované kódy funkcí

Měřicí modul podporuje veřejné kódy funkcí s registrovým přístupem, kdy se registr skládá ze dvou bajtů. Modul reaguje na následující kódy funkcí podle Tabulka 7 v kapitole 3.4.

- zapiš jednu cívku,
- čti vstupní registry,
- zapiš více registrů.

Funkce zapiš jednu cívku 05(0x05):

Tato funkce slouží k nastavení jednoho výstupu do stavu ON nebo OFF. V požadavku je specifikována adresa výstupu, který se má nastavit a hodnota na kterou se má nastavit. Hodnota 0x0000 znamená OFF, 0xFF00 znamená ON. Normální odpověď je kopii požadavku.

Měřicí modul obsahuje jedno relé s adresou 0x0000, které budeme danou funkcí ovládat.

Kód funkce	1 byte	0x05
Adresa výstupu	2 byte	0x0000
Hodnota výstupu	2 byte	0x0000 nebo 0xFF00

**Tabulka 13 - Požadavek funkce 0x05**

Kód funkce	1 byte	0x05
Adresa výstupu	2 byte	0x0000
Hodnota výstupu	2 byte	0x0000 nebo 0xFF00

**Tabulka 14 - Odpověď funkce 0x05**

Kód funkce	1 byte	0x85
Adresa výstupu	1 byte	01, 02, 03 nebo 04

**Tabulka 15 - Chyba funkce 0x05**

Funkce čti vstupní registry 04(0x04):

Tato funkce slouží ke čtení obsahu souvislého bloku až 125 vstupních registrů. V požadavku je specifikována adresa prvního registru a počet registrů. V odpovědi odpovídá každému registru dvojice bajtů. Vstupní registry jsou pouze pro čtení a jsou to data poskytovaná I/O systémem. Měřicí modul poskytuje hodnotu osmi A/D převodníků pro měření termočlánků v celočíselném 32 bitovém formátu se znaménkem pro jeden vstup, to znamená, že hodnota jednoho termočláňkového vstupu se bude přenášet pomocí dvou Modbus registrů. Všechny hodnoty termočláňkových vstupů se přenesou pomocí 16-ti registrů s adresou 0x0000-0x000F. Dalším registrem s adresou 0x0010 je registr obsahující teplotu měření srovnávacího konce.

V registrech s adresou 0x0011- 0x0016 jsou uloženy hodnoty A/D převodníků pro měření napětí.



Kód funkce	1 byte	0x04
Počáteční adresa	2 byte	0x0000 až 0x0016
Počet registrů	2 byte	1 až 23

**Tabulka 16 - Požadavek funkce 0x04**

Kód funkce	1 byte	0x04
Počet bytů	1 byte	0x0000
Hodnota výstupu	2*N bytů	N-počet registrů

**Tabulka 17 - Odpověď funkce 0x04**

Kód funkce	1 byte	0x84
Adresa výstupu	1 byte	01, 02, 03 nebo 04

**Tabulka 18 - Chyba funkce 0x04**

Funkce zapiš více registrů 16(0x10):

Tato funkce slouží k zápisu bloku až 120 registrů. V požadavku je specifikována adresa prvního registru, který se má zapsat, počet registrů a hodnoty, které se mají zapsat. Normální odpověď obsahuje počáteční adresu a počet zapsaných registrů. Uchovávací registry slouží ke čtení a zápisu dat, jsou to data modifikovatelná aplikačním programem. Do registrů budeme aplikačním programem zapisovat hodnoty požadovaných výkonů jednotlivých topení. Pro osm výstupních signálů použijeme prvních osm registrů s adresou 0x0000-0x0007. V nižším bajtu registru se ukládá hodnota pro počet neseprtých půlperiod, ve vyšším bajtu se ukládá hodnota počtu seprtých půlperiod. V registru s adresou 0x0008 je uložena hodnota pro sepnutí výstupního relé. Registr s adresou 0x0009 je status byte, registr s adresou 0x000A je velikost FIFO a registr s adresou 0x000B je komunikační rychlost.

Kód funkce	1 byte	0x10
Počáteční adresa	2 byte	0x0000 až 0x000B
Počet registrů	2 byte	1 až 9
Počet bytů	1 byte	2*N
Hodnoty registrů	2*N bytů	N-počet registrů

**Tabulka 19 - Požadavek funkce 0x10**

Kód funkce	1 byte	0x10
Počet bytů	1 byte	0x0000 až 0x0008
Hodnota výstupu	2*N bytů	1 až 9

**Tabulka 20 - Odpověď funkce 0x10**

Kód funkce	1 byte	0x90
Adresa výstupu	1 byte	01, 02, 03 nebo 04

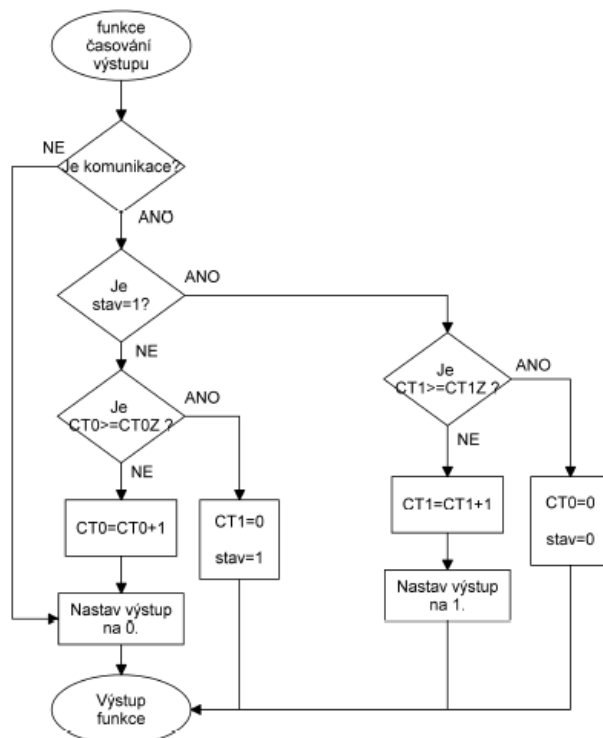
**Tabulka 21 - Chyba funkce 0x10**

V Příloha 2 a Příloha 3 jsou tabulky obsazení vstupních a uchovávacích registrů měřicího modulu včetně adres.

## 5.5 Řízení výstupů pro SSR

V programu je vytvořena struktura *T\_regulator*, ze které je vytvořeno pole jako globální proměnná o délce 8 položek. Ve struktuře se uchovávají stavy čítačů a řídicích proměnných pro jednotlivé výstupy řízení SSR. Řídicí program v PC podle vypočtené akční veličiny v rozsahu 0-100 %, stanoví pro daný výkon počet neseprtých a seprtých půlperiod pro řízení s proměnnou časovou bází viz kapitola 4.5.

Tuto hodnotu předá měřicímu modulu ve dvou bajtech jako jeden Modbus registr pro každý výstup, přičemž jeden bajt nese informaci o počtu neseprtých půlpln a druhý o počtu seprtých půlpln. Řízení výstupů má na starosti funkce *SSR\_control()*, která ve smyčce provede 8x algoritmus podle Obrázek 5.8 pro všechny SSR výstupy. Funkce je periodicky volána v intervalu 1 ms. Oba bajty nesoucí informaci o počtu půlpln se vynásobí 10x a tak získáme potřebnou délku výstupního impulsu pro sepnutí požadovaného počtu půlpln v [ms]. Proměnné CT0 a CT1 jsou čítače uběhnutých milisekund, CT0Z a CT1Z jsou vypočtené hodnoty pro dobu sepnutí a vypnutí výstupu. Algoritmus ještě vyhodnocuje proměnnou *komunikace\_ok* z modulu *modbus\_RTU*, která je nastavena do log. 1 při funkční komunikaci. Při výpadku komunikace a tím pádem ztrátou kontroly nad procesem algoritmus všechny výstupy nastaví do log. 0 a odstaví tak topná tělesa od proudu. Při ztrátě komunikace je vypnut i reléový výstup pro hlavní stykač.



Obrázek 5.8 - Vývojový diagram funkce řízení výstupů pro SSR

## 6 NÁVRH HARDWARE ROZVADĚČE

Celé zařízení regulátoru horkých vtoků je v provedení pultového rozvaděče od výrobce RITTAL, který dané pulty vyrábí v šířkách 600 mm, 800 mm a 1200 mm.

Podle rozměrů a počtu komponentů, které mají být v rozvaděči umístěny, byl vybrán pult s rozměry 1200 mm. Pro vizualizaci je použit sedmnáctipalcový dotykový panel NEXIO, připojený k řídicímu PC. Řídicí počítač je v provedení bez mechanických částí pro zajištění dlouhé životnosti, kde chlazení je pasivní bez ventilátoru a disk je v provedení SSD. Pro komunikaci s nadřazeným systémem a měřicími moduly jsou použity převodníky USB-RS485.

Výkony topných těles v horkých vtocích se pohybují v rozmezí 300 až 3000 W při napětí 230 V a celkový výkon horkých vtoků s 56 zónami se blíží k 40 kW. Maximální proud na jednu zónu je  $3000W/(230V \cdot \cos 0) = 13 A$ , a celkový proud zařízení je při třífázovém přívodu

$$I_c = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \varphi} = \frac{40000W}{\sqrt{3} \cdot 400V \cdot 1} \cong 58 A$$

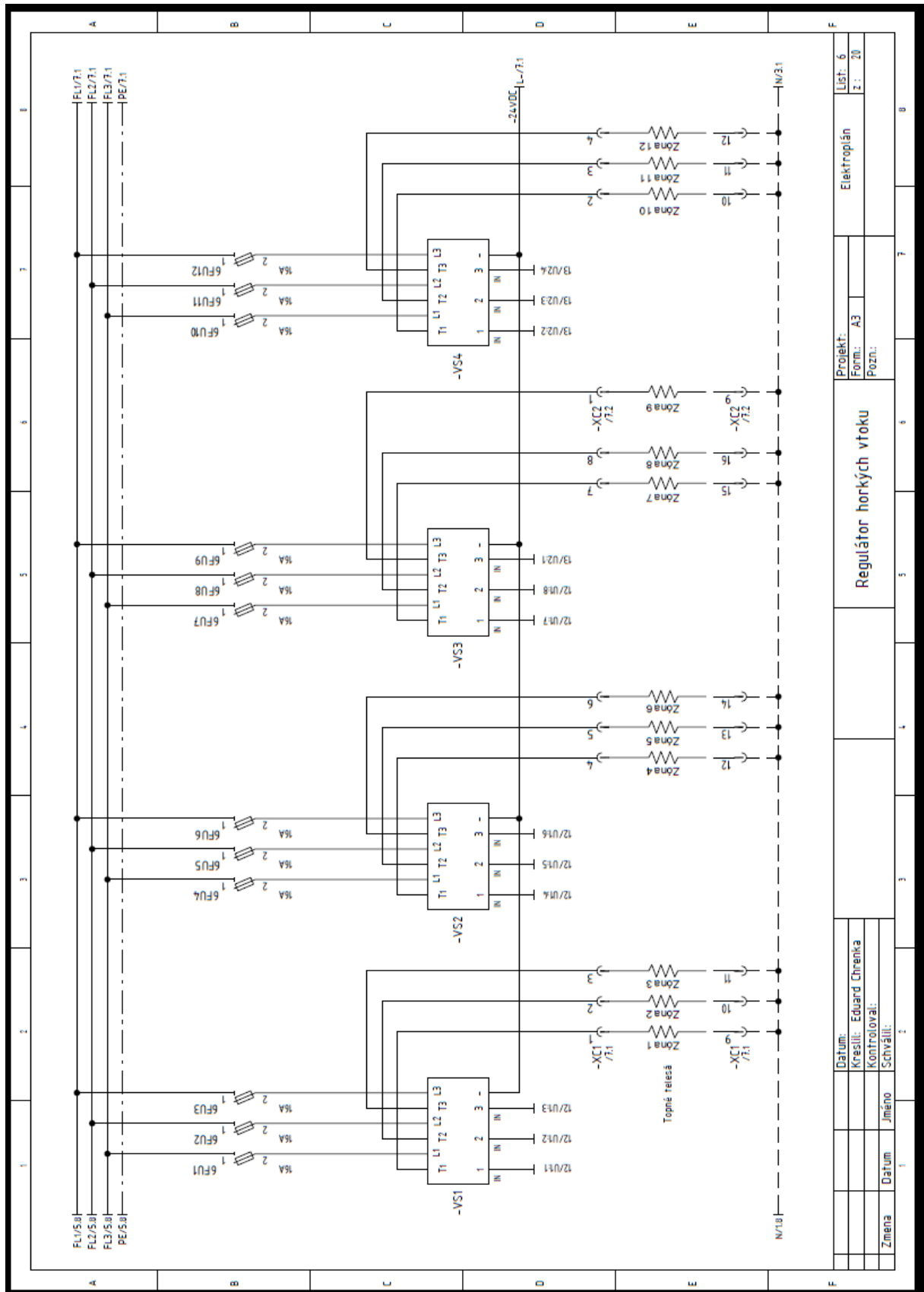
Přívod pro rozvaděč je pohyblivý s třífázovou koncovkou 63A. Rozvaděč obsahuje hlavní vypínač, jistící prvky pro počítač, monitor a zdroj napětí 230V/24V stejnosměrných. Napájení do SSR modulů je spínáno stykačem KM1, který je ovládán z měřicího modulu, je sepnut jen v případě, že požadujeme topení alespoň jedné zóny.

Stykač plní zároveň bezpečnostní funkci v případě proražení některého SSR, kdy by se nekontrolovaně přehřála příslušná zóna. Na výstupu stykače jsou připojeny tři měřicí transformátory proudu, a tři měřicí transformátory napětí, které jsou připojeny do měřicích modulů podle Obrázek 6.1.

Na Obrázek 6.2 je zapojení SSR se spínacím proudem 20 A, kde každá zóna je samostatně jištěna pojistkou s rychlým vybavením pro jištění polovodičů PV510 gR 16 A. Jednotlivé SSR jsou ovládány z měřicího modulu podle Obrázek 6.3. Pojistky i SSR jsou dimenzovány na vypočtený proud nejvýkonnějšího tělesa 13 A.

Celkové schéma zapojení rozvaděče je v Příloha 1.





Projekt: Elektroplán		List: 6	
Form: A3		L: 20	
Pozn:			
<b>Regulátor horkých vtoku</b>			
Datum: Eduard Chrenka			
Kreslil: Eduard Chrenka			
Kontroloval:			
Schválil:			
Změna	Jméno	Datum	

Obrázek 6.2 - Zapojení modulů SSR



## 7 PROGRAM PRO PC

Cílem bylo navrhnout program pro obsluhu systému regulace teploty horkých vtoků tak, aby se dal co nejjednodušeji ovládat dotykovým panelem. Proto je grafické uživatelské rozhraní řešeno s minimálním počtem hierarchických úrovní oken. Program pro PC je napsán v programovacím jazyku PASCAL, ve vývojovém prostředí DELPHI s následujícími funkcemi:

- Komunikace s jednotlivými měřicími moduly a zpracování naměřených dat.
- Komunikace s nadřazeným systémem protokolem EUROMAP 17, kde jako periferní jednotka přijímá povely a odesílá požadované data.
- Provádění diagnostiky topných těles.
- Uchovávání receptur pro jednotlivé vstřikovací formy.
- Nastavování PID parametrů jednotlivých regulátorů teploty.
- Vizualizace stavu jednotlivých topných zón.

Aplikace je napsána jako více vláknová, kde v hlavním vláknu aplikace pracují vizuální komponenty. Ve vláknu s názvem *komunikace* probíhá komunikace s měřicími moduly a nakonec ve vláknu *komunikace\_euromap* probíhá komunikace s nadřazeným systémem.

Ve vláknu *komunikace* je periodicky s intervalem 1s čten stav vstupních registrů jednotlivých měřicích modulů, obsahující hodnoty A/D převodníků, teploty měření izotermické svorkovnice a hodnoty měření napětí nebo proudu.

Algoritmus provede ve funkci *linearizace* převod A/D hodnoty (napětí termočlátku) na teplotu pomocí interpolačního polynomu (7.1), čímž získáme relativní teplotu tj. rozdíl teplot mezi měřicím a srovnávacím koncem termočlátku (izotermickou svorkovnicí). Nakonec se provede korekce teploty izotermické svorkovnice podle (7.2), čímž získáme absolutní teplotu měřicího konce.

$$T_M = a_0 + a_1V + a_2V^2 + a_3V^3 + \dots + a_nV^n \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (7.1)$$

$$T_{abs} = T_M + T_S \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (7.2)$$

kde:

$T_{abs}$  - absolutní teplota měřicího konce [°C]

$T_M$  – relativní teplota (rozdíl teplot mezi měřicím a srovnávacím koncem) [°C]

$T_S$  – absolutní teplota srovnávacího konce (teplota izotermické svorkovnice) [°C]

$a_n$  – koeficienty polynomické aproximace (tabulka 23) [-]

$V$  – napětí změřené na termočlátku [ $\mu$ V]

Typ termočlánku							
	B	E	J	K	R	S	T
Rozsah	300° do 1700 °C	0° do 1000 °C	0° do 760 °C	0° do 500 °C	-50° do 250 °C	-50° do 250 °C	0° do 400 °C
a <sub>0</sub>	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
a <sub>1</sub>	1,20202322666	1,7057035E-2	1,978425E-2	2,508355E-2	1,8891380E-1	1,84949460E-1	2,592800E-2
a <sub>2</sub>	-3,834603094E-3	-2,3301759E-7	-2,001204E-7	7,860106E-8	-9,3835290E-5	-8,00504062E-5	-7,602961E-7
a <sub>3</sub>	1,0145436699E-5	6,5435585E-12	1,036969E-11	-2,503131E-10	1,3068619E-7	1,02237430E-7	4,637791E-11
a <sub>4</sub>	-1,643117876E-8	-7,3562749E-17	-2,549687E-16	8,315270E-14	-2,2703580E-10	-1,52248592E-10	-2,165394E-15
a <sub>5</sub>	1,540686905E-11	-1,7896001E-21	3,585153E-21	-1,228034E-17	3,5145659E-13	1,88821343E-13	6,048144E-20
a <sub>6</sub>	-7,66617153E-15	8,4036165E-26	-5,344285E-26	9,804036E-22	-3,8953900E-16	-1,59085941E-16	-7,293422E-25
a <sub>7</sub>	1,562876708E-18	-1,3735879E-30	5,099890E-31	-4,413030E-26	2,8239471E-19	8,23027880E-20	
a <sub>8</sub>		1,0629823E-35		1,057734E-30	-1,2607281E-22	-2,34181944E-23	
a <sub>9</sub>		-3,2447087E-41		-1,052755E-35	3,1353611E-26	2,79786260E-27	
a <sub>10</sub>					-3,3187769E-30		
Chyba		± 0.02 °C	± 0.05 °C	± 0.05 °C	± 0.02 °C	± 0.02 °C	± 0.03 °C

**Tabulka 22 - Koefficienty polynomické aproximace termočlánků [37]**

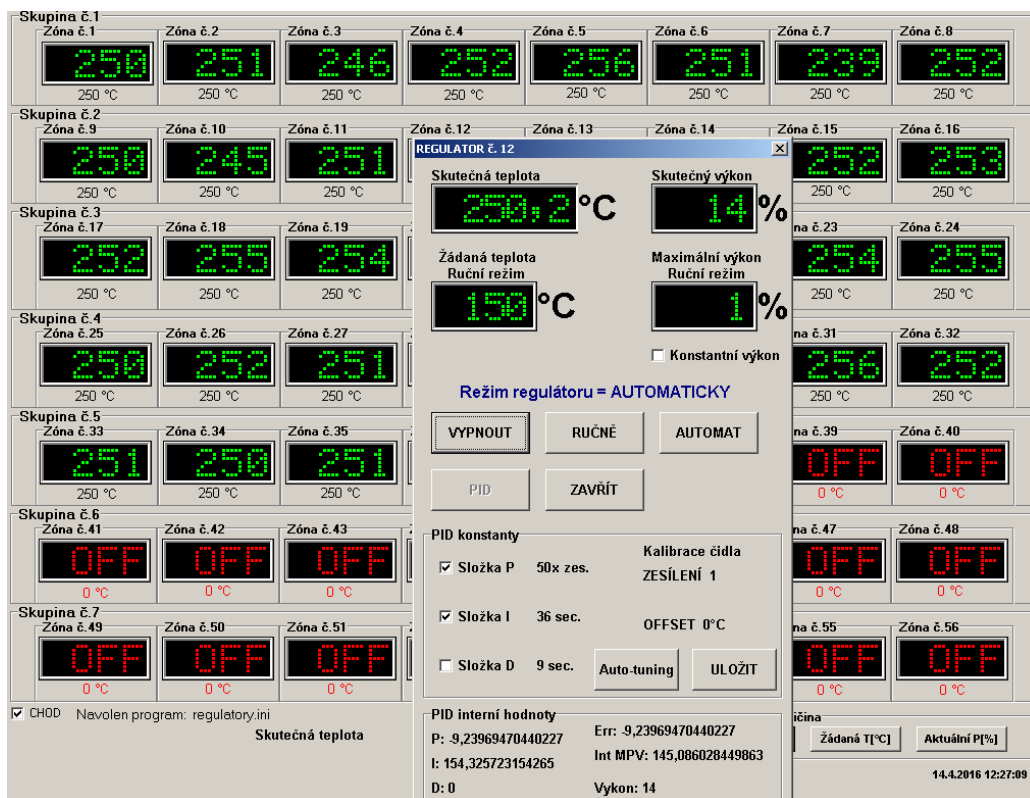
Po výpočtu teplot se tyto předají včetně požadovaných teplot pro jednotlivé zóny do funkce *PID\_calc*, která podle kapitoly 3.9 vypočte požadovaný akční zásah včetně ošetření wind-up efektu statickou metodou a výsledek odešle na uchovávací registry měřících modulů pro řízení SSR.

Ve vláknu *komunikace\_euromap* se provádí komunikace s nadřazeným systémem, kdy se zpracovávají povely pro jednotlivé teplotní zóny a odesílají se požadované data.

Na Obrázek 7.1 je hlavní obrazovka zobrazující stav jednotlivých zón. Kliknutím na konkrétní zónu se zobrazí okno s detaily pro danou zónu, kde můžeme nastavovat PID parametry příslušného regulátoru ručně, nebo můžeme spustit auto-tuning, kterému zodpovídá funkce v programu *Relay\_Tuning()*. Tato funkce pracuje jako relé bez hystereze podle kapitoly 3.10. Funkce měří kritickou periodu  $T_{krit}$  (interval mezi dvěma sepnutými relé) a amplitudu kmitů regulované soustavy, kde výpočet kritického zesílení  $K_{krit}$  probíhá podle vztahu (3.11). Příslušné parametry  $K$ ,  $T_I$ ,  $T_D$  se vypočítají ZN metodou podle (tabulky 9) funkcí *ZN\_calcul*.

Navíc je možnost vyřadit regulátor z činnosti např. při poruše termočlánku a pro zónu nastavit konstantní výkon. Tato funkce se hodí v případě poruchy termočlánku při výrobě, přičemž nemusíme výrobu okamžitě ukončit, ale můžeme výrobu dokončit s konstantním výkonem porouchané zóny.

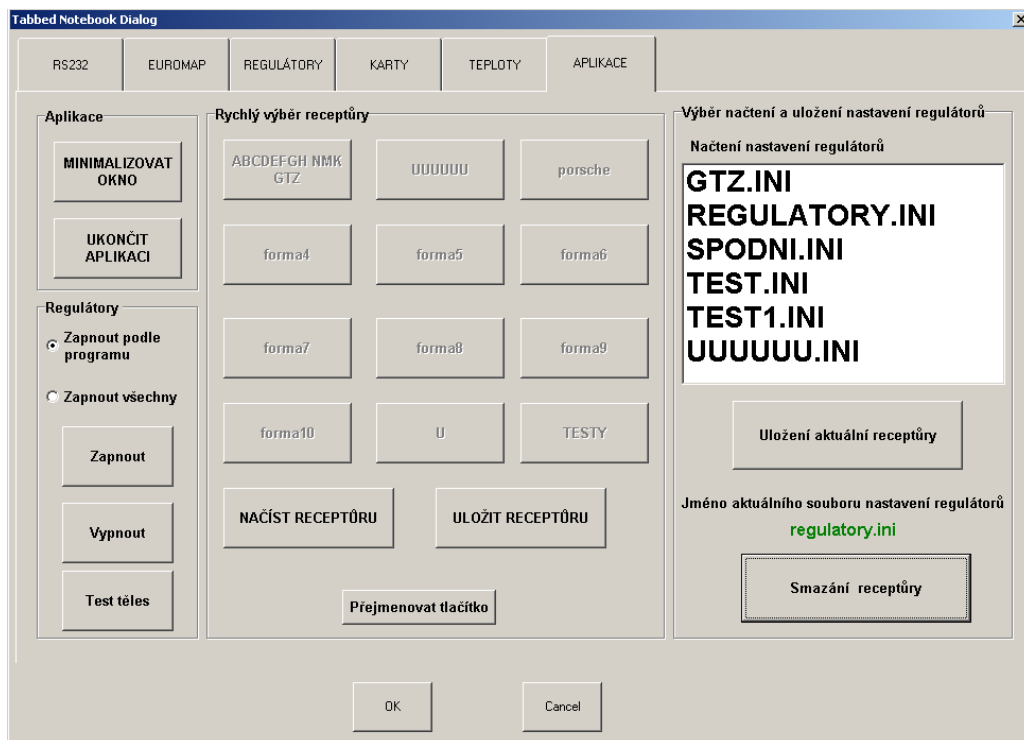




Obrázek 7.1 - Hlavní obrazovka zobrazující teploty zón

Na Obrázek 7.2 je obrazovka pro uložení aktuálního nastavení, nebo vyvolání receptury pro konkrétní formu. Tato volba se uplatňuje v případě, když se nevyužívá komunikace s nadřazeným systémem. Operátor má možnost výběru příslušné receptury ze seznamu, nebo rychlou volbou pomocí 12-ti předdefinovaných tlačítek.

Je možno spustit i test těles, kdy se provede kontrola funkčnosti všech těles instalovaných ve vtokové soustavě. K tomuto účelu se používá měření napětí a proudu, kdy se algoritmem zapne SSR pouze jedné zóny a změří se proud a napětí, ze kterého se vypočte výkon daného tělesa. Tento výkon se porovná s hodnotou uloženou v receptuře příslušné formy. Při neshodě uloženého a vypočteného výkonu je aktivováno oznámení o poruše tělesa. Tento postup se zopakuje postupně pro všechny zóny vstříkovací formy.



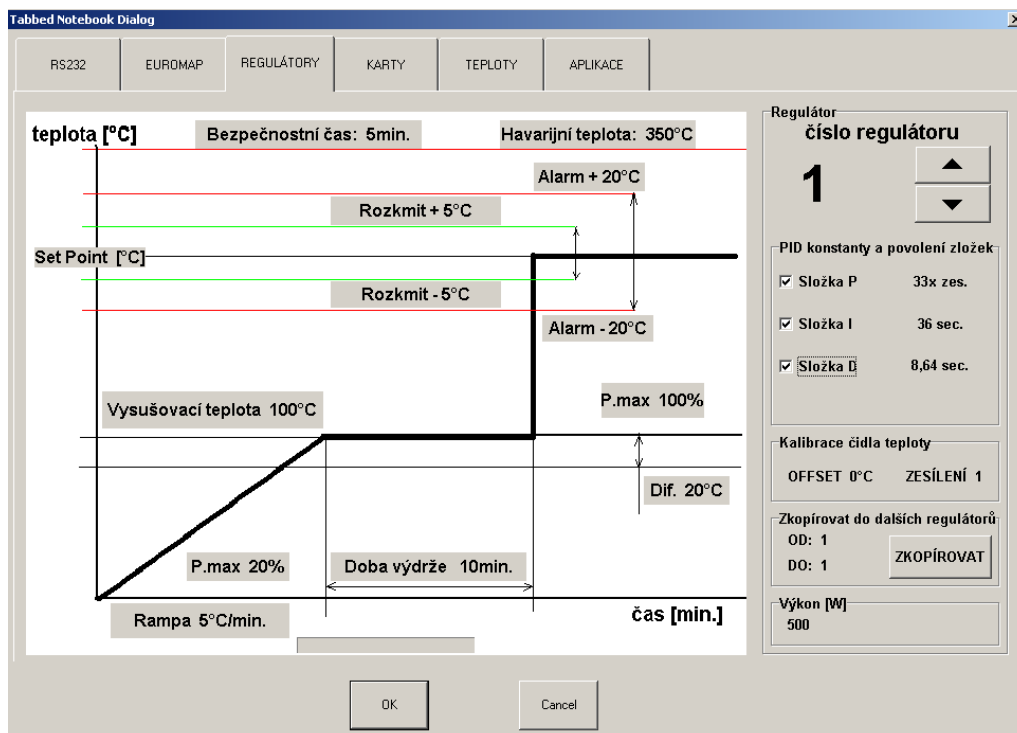
**Obrázek 7.2 - Obrazovka pro ukládání receptur a rychlou volbu.**

Na Obrázek 7.3 je obrazovka pro nastavení náběhových profilů teploty regulátorů. Topná tělesa jsou nejnáchylnější na poškození ve fázi náběhu ze studeného stavu. Výrobci doporučují pozvolný teplotní nárůst s časovou prodlevou na tzv. vysušovací teplotě.

Proto má každý regulátor možnost nastavení rychlosti nárůstu teploty s omezením maximálního výkonu, kdy výkon má vyšší prioritu než náběhová rampa. Dále se dá nastavit požadovaná teplota a čas výdrže, po které nastává již finální fáze náběhu na požadovanou provozní teplotu. Regulátory mají ještě možnost nastavení technologických limitů teploty, kdy se při překročení limitů změní barva daného zobrazovače teploty na červenou, taktéž se přepne barva výstražného majáku na červenou, případně se dá ještě blokovat provoz stroje.

Překročení nastavené havarijní teploty má za následek vypnutí hlavního stykače a tím pádem odstavení elektrické energie od těles.

Každá zóna v průběhu náběhového profilu pracuje formou stavového automatu, kdy automat přechází mezi jednotlivými stavy na základě splněných podmínek a podle stavů posílá žádanou hodnotu na funkci *PID\_calc* zmiňované výše. Hodnoty náběhového profilu se zadávají kliknutím na danou položku, kdy se zobrazí na obrazovce klávesnice pro zadání nové hodnoty. Po zadání hodnoty a kliknutím na tlačítko enter se nová hodnota uloží a klávesnice se ztratí z obrazovky.



Obrázek 7.3 - Nastavení náběhového profilu regulátorů

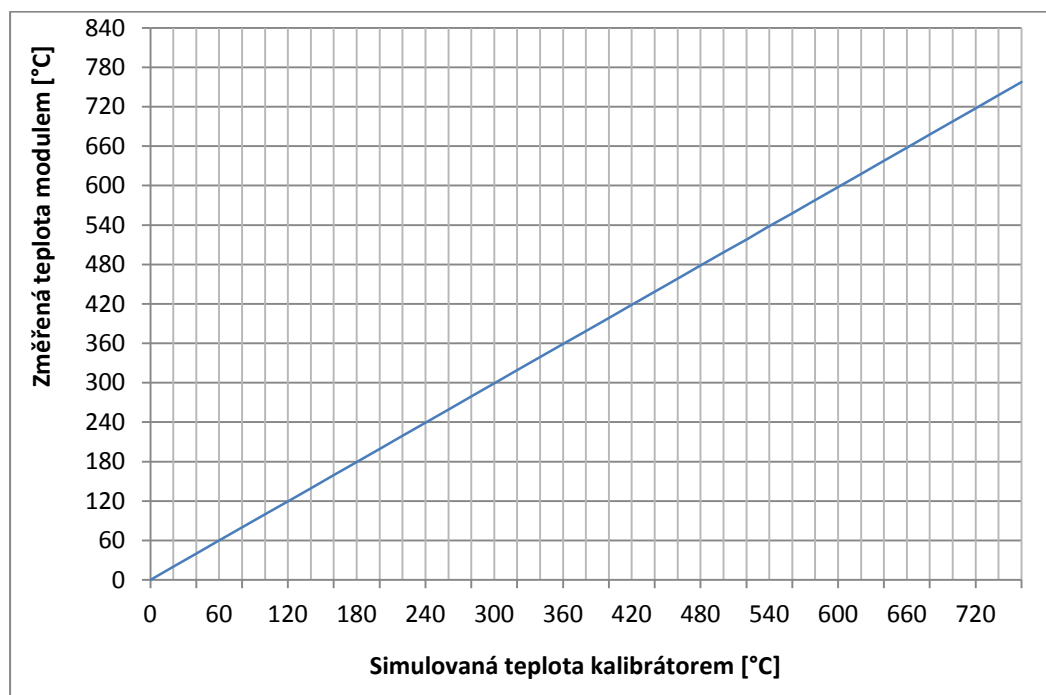
## 8 EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ

V následujících kapitolách jsou popsány testy a jejich výsledky:

- Měření termočlánků.
- Měření napětí.
- Auto-tuning.
- Regulace.

### 8.1 Měření termočlánků

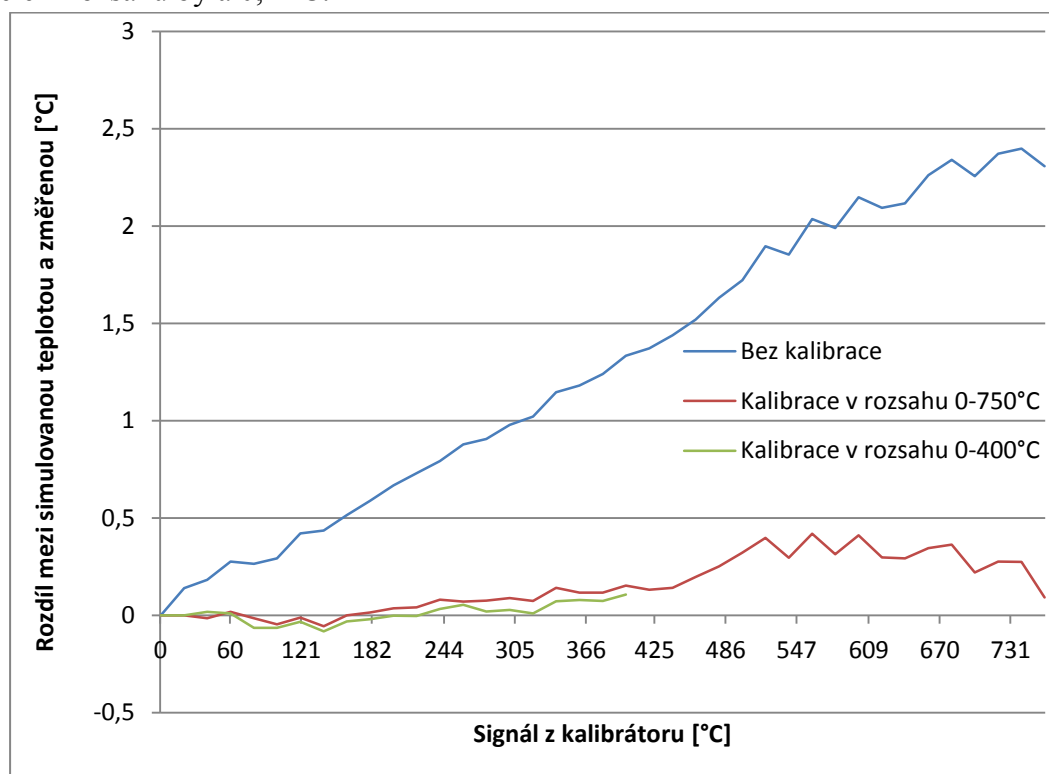
Ověření přesnosti měření termočlávkových vstupů proběhlo pomocí kalibrátoru MEATEST M505D. Aby se do testu nevnášela chyba měření teploty izotermické svorkovnice, bylo měření prováděno bez korekce teploty izotermické svorkovnice. Na kalibrátoru se nastavovali hodnoty teploty pro referenční teplotu 0 °C. Teplota byla nastavována s krokem 20 °C od 0 °C po 750 °C. Hodnoty teploty simulované kalibrátorem a změřená teplota měřícím modulem byly vyneseny do grafu na Obrázek 8.1. Z grafu je patrné, že křivky jsou lineární a hodnoty jsou téměř totožné.



Obrázek 8.1 - Graf měření linearitě teploty

V programu MS EXCEL se vypočetl rozdíl teplot simulované a změřené, který je zobrazen v grafu na Obrázek 8.2. Modrá křivka (bez kalibrace) znázorňuje rozdíl změřené teploty modulem bez použití kalibrace. Je vidět, že odchylka teplot se lineárně zvětšuje až po rozdíl 2,5 °C při maximální teplotě 750 °C. Z toho je patrné, že se projevila chyba zesílení A/D převodníku. Tato chyba byla vykompenzována kalibrací,

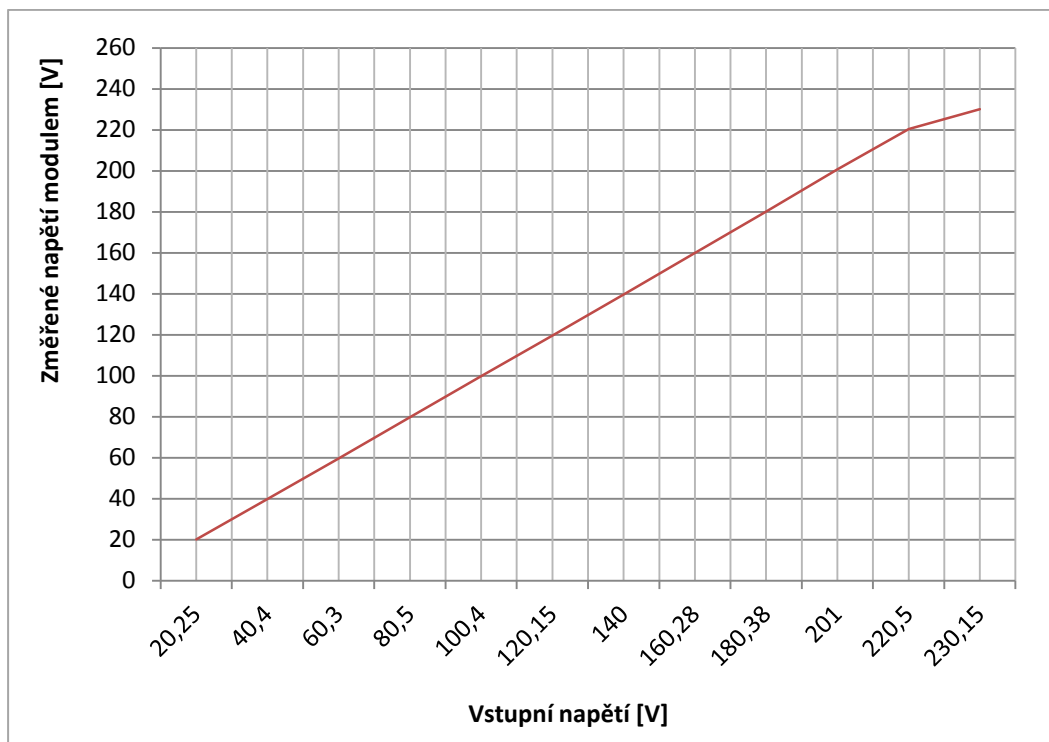
kde se použil multiplikační koeficient pro úpravu výsledného měření. Na zelené a červené křivce je zobrazen výsledek, ze kterého je patrné, že maximální chyba odchylky mezi simulovanou teplotou a korigovanou změřenou je pouze 0,1 °C v předpokládaném pracovním rozsahu, který je u vstřikovacích forem 200-300 °C. Maximální chyba v celém rozsahu byla 0,4 °C.



Obrázek 8.2 - Graf rozdílu hodnot simulované teploty a změřené

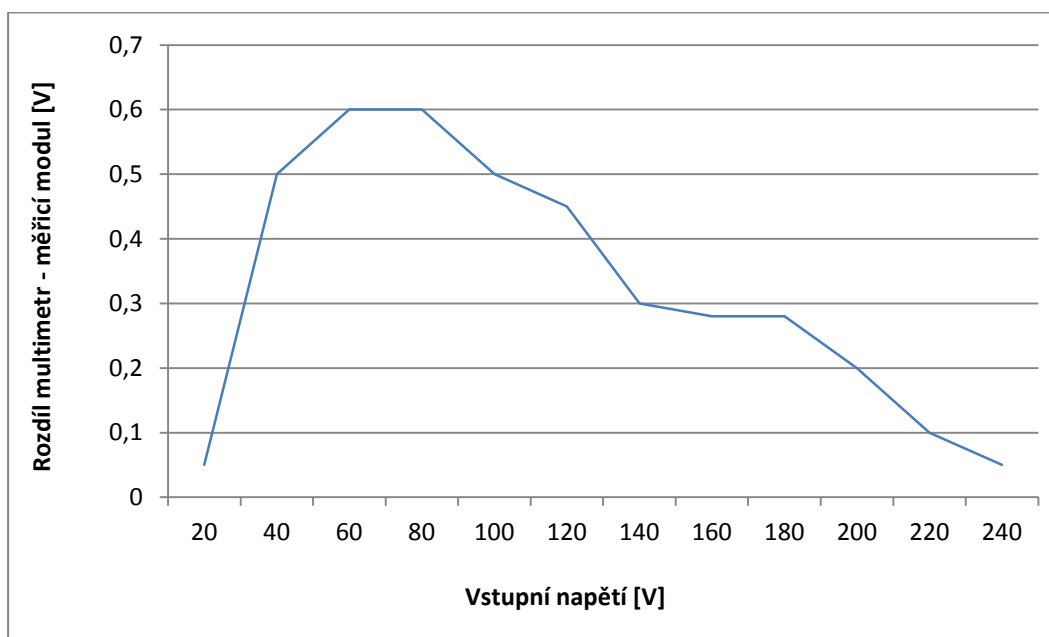
## 8.2 Měření napětí

Ověření přesnosti měření napěťových vstupů proběhlo následovně. Podle kapitoly 4.4 byla použita vstupní úprava pro měření napětí, na kterou byl připojen auto-transformátor, s možností změny střídavého napětí 0-230 V. Napětí bylo měněno v kroku 20 V. Jako kontrolní měřicí přístroj byl použit multimetr FLUKE 179 TRMS. Z grafu na Obrázek 8.3 vidíme, že výstup z převodníku je lineární a změřená hodnota napětí měřícím modulem je téměř shodná s údajem multimetru.



**Obrázek 8.3 - Graf měření linearity napětí**

Do grafu na Obrázek 8.4. byl vynesena rozdíl napětí změřeného multimetrem a měřicím modulem. Z grafu není patrná chyba zesílení, ale vidíme integrální chybu, která vyjadřuje odchylku skutečné charakteristiky od ideální charakteristiky. V tomto případě by pomohla kalibrace pomocí offsetu, kde by se k změřené hodnotě přičetla hodnota 0,3 V, a tak by vznikla chyba měření  $\pm 0,3$  V.

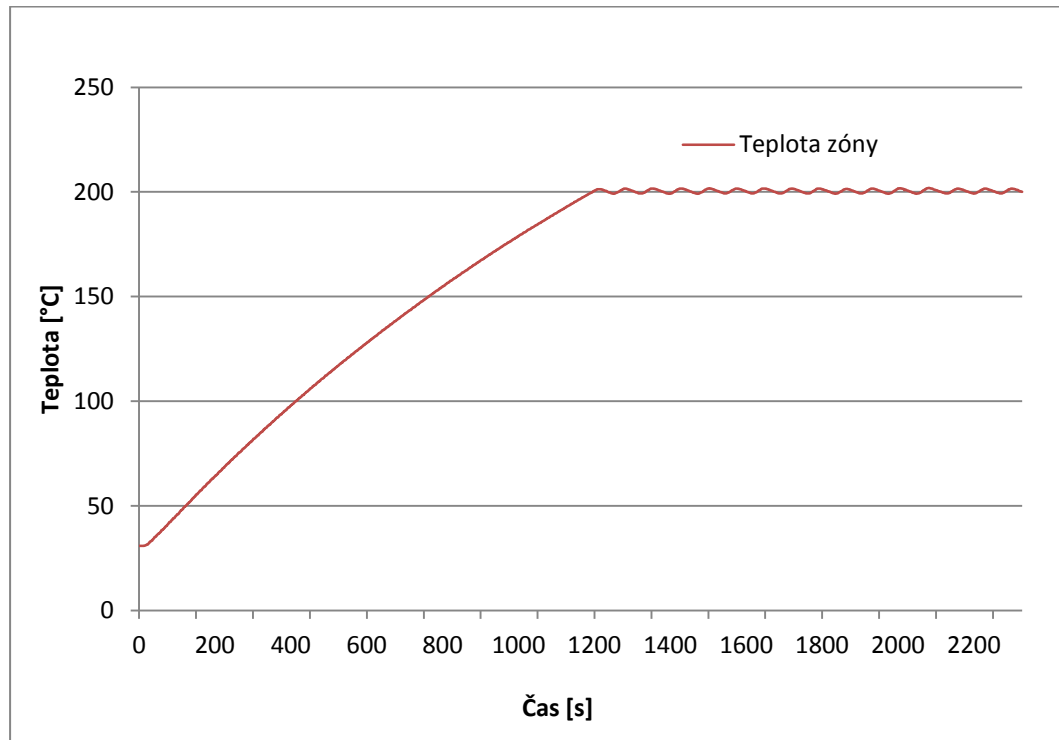


**Obrázek 8.4 - Rozdíl napětí mezi multimetrem a měřicím modulem**

### 8.3 Auto-tuning

Po změření charakteristik měřícího modulu byl proveden test algoritmu auto-tuningu a následně test kvality regulace s parametry  $K$ ,  $T_I$ ,  $T_D$  získané auto-tuningem.

Žádaná teplota byla nastavena na 200 °C, kdy relé ve zpětné vazbě sepnulo a teplota začala narůstat. Po dosažení žádané teploty začalo relé cyklovat a systém se uvedl do netlumených kmitů podle Obrázek 8.5.



Obrázek 8.5 - Náběh teploty a začátek kmitání soustavy

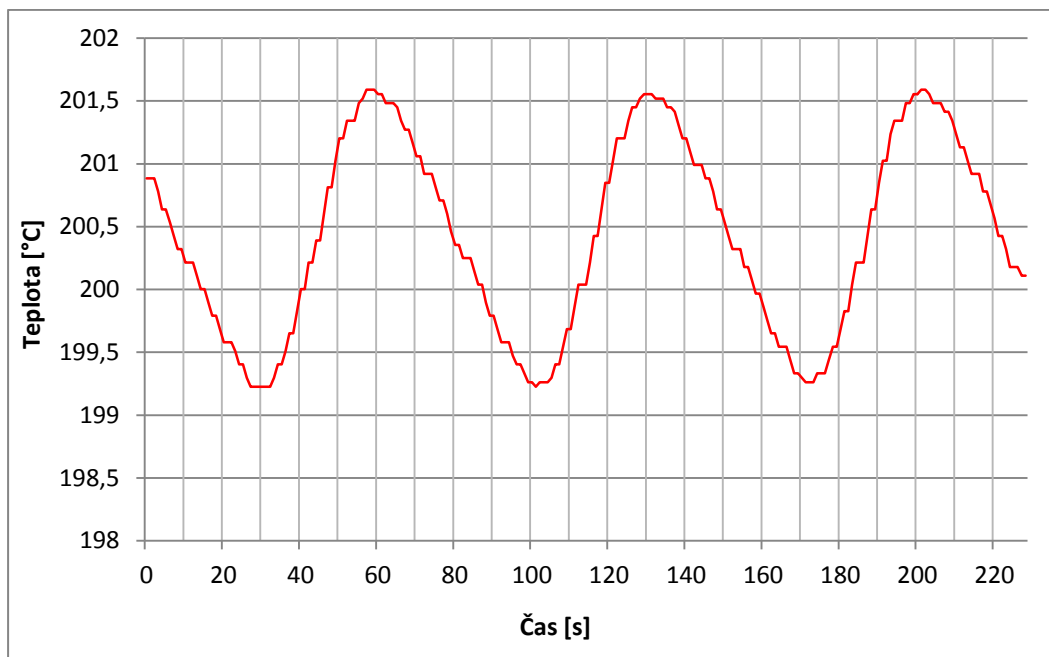
Z detailu na Obrázek 8.6 se dá odečíst kritická doba periody  $T_{krit} = 72$  s, a amplituda výstupu soustavy 1,15 °C při amplitudě vstupního signálu 50 %, kde ze vztahu (3.11) vyšlo kritické zesílení  $K_{krit} = 55$ .

Podle Tabulka 9 algoritmus vypočetl hodnoty pro regulátor:

$K_c - 33$ ,

$T_I - 36$ s,

$T_D - 8,64$ s.

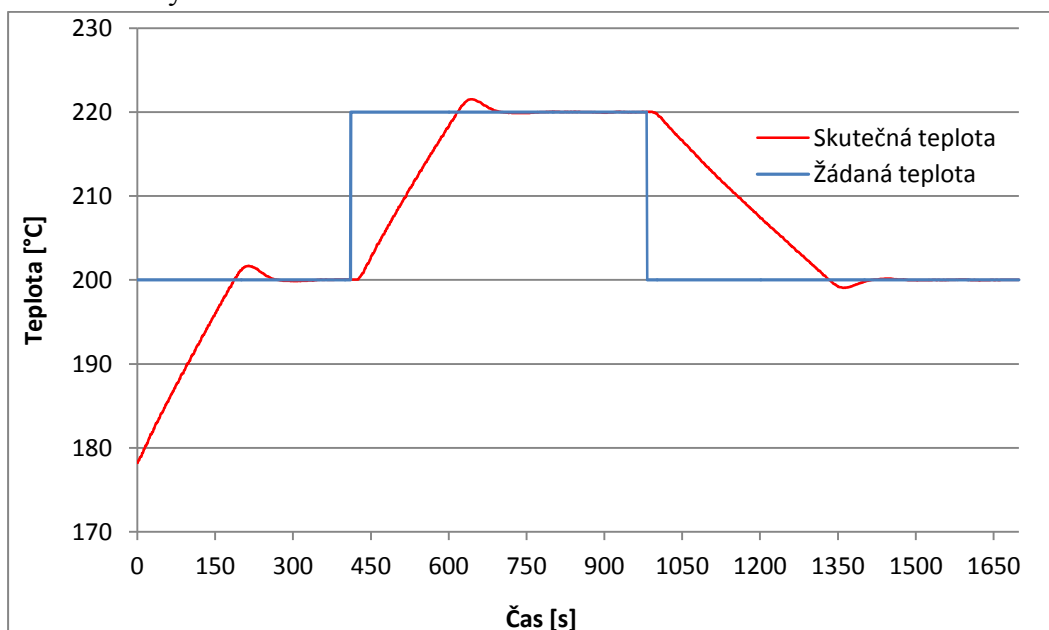


Obrázek 8.6 - Detail ustálených kmitů soustavy.

## 8.4 Regulace

Po nastavení regulátoru byl proveden test kvality regulace. Teplota byla nastavena na 200 °C, kde po ustálení výstupní hodnoty byl proveden skok žádané teploty na 220 °C, a po novém ustálení skok zpět na 200 °C.

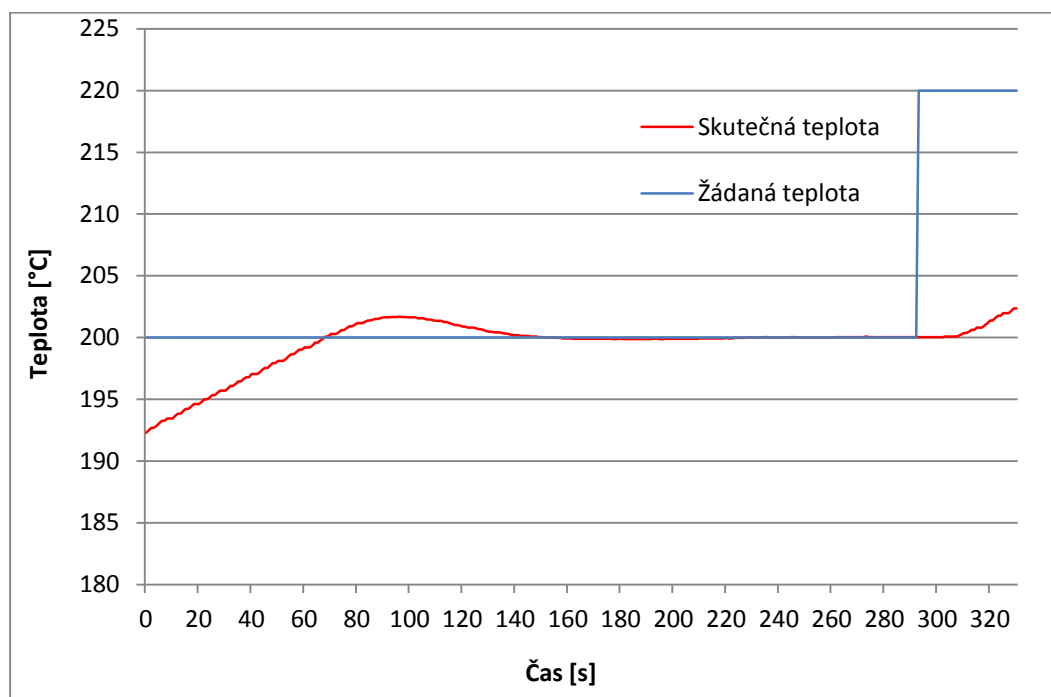
Z grafu na Obrázek 8.7 je vidět průběh regulace s minimálním regulačním překmitem a rychlém ustálení na žádané teplotě, kde úplně splývá křivka žádané a skutečné hodnoty.



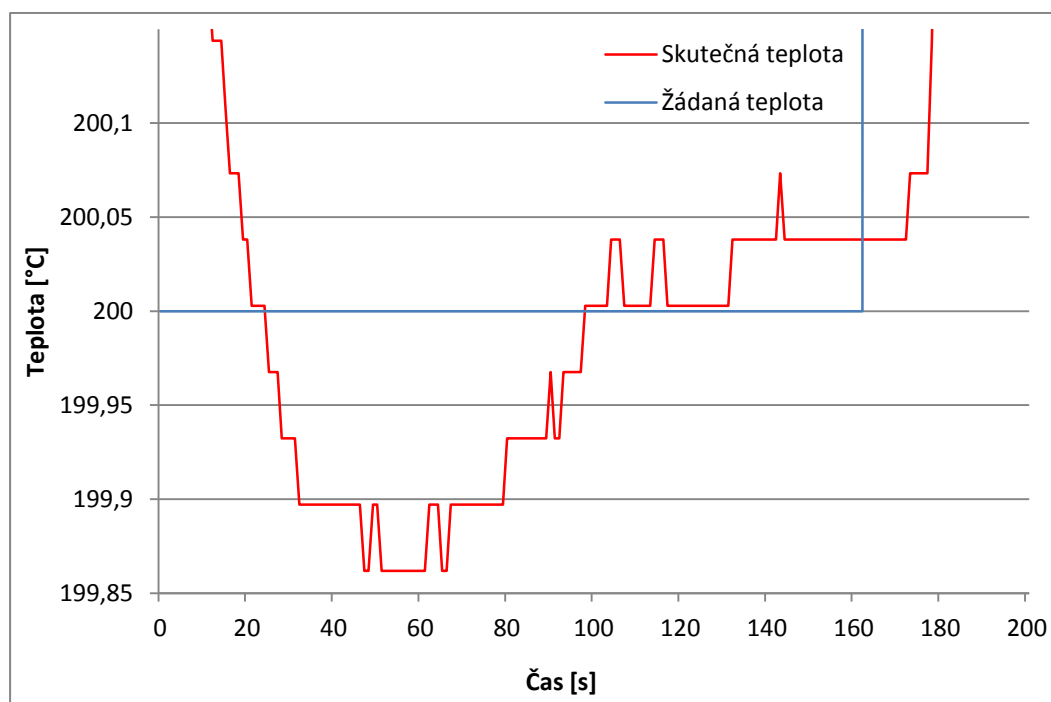
Obrázek 8.7 - Průběh regulace při skokové změně žádané hodnoty



Na Obrázek 8.8 a Obrázek 8.9 je detail regulačního překmitu. Vidíme, že maximální hodnota prvního překmitu je 2 °C a hodnota druhého překmitu je 0,15 °C. Dále je už hodnota stabilní, mění se pouze v setinách °C, což při rozlišení měření teploty termočlánků 0,0373 °C můžeme považovat za kvantizační šum.



Obrázek 8.8 - Detail regulačního překmitu.



Obrázek 8.9 - Detail regulačního překmitu

## 9 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce byl návrh, výroba a uvedení do praxe regulátoru horkých vtoků pro vstříkovací formy.

V diplomové práci byl proveden teoretický rozbor jednotlivých problematik, se kterými bylo potřeba při návrhu zařízení pro regulaci horkých vtoků pracovat. Podle mého názoru, bylo vždy z jednotlivých možných řešení připadajících v úvahu vybráno to nejvhodnější.

Jako první byla provedena identifikace systému (jedné teplotní zóny) pro získání představy o přenosu soustavy a jejich časových konstantách.

Pak následoval návrh zapojení měřícího modulu a výroba první zkušební DPS. Při ožívování a testování měřícího modulu byly zjištěny nedostatky prvního řešení, které byly odstraněny v revizi 2.

Změny bylo potřeba provést v jištění zdrojové části a v části napájení 3,3V. Dále byly přepracovány výstupy pro ovládání SSR a poté byl upraven vstupní filtr měření termočlánků.

Po úspěšném vyrobení, odzkoušení všech 7 kusů potřebných pro cílové zařízení, byl naprogramován firmware měřícího modulu. Následně byl vytvořen projekt silové části rozvaděče. Podle projektu silové části byly všechny komponenty elektrické výzbroje nainstalovány do pultového rozvaděče RITTAL, včetně celkového zapojení.

Pak přišla fáze tvorby programu do PC a testů měřících modulů včetně regulace. Po úspěšném několikadenním testu hotového zařízení na vyřazené vstříkovací formě, a po odsouhlasení technology, bylo zařízení nainstalováno na vstříkovací lis HUSKY 2700.

Silová část spínání SSR, měření teplot a regulace fungovaly bez problémů, jen bylo potřeba doladit komunikaci mezi zařízením a nadřazeným systémem, který zpočátku hlásil chybu komunikace EUROMAP 17. Naštěstí stroj může pracovat i bez komunikace s horkými vtoky, proto nedošlo k výpadku výroby. Po následném ladění komunikace byla odstraněna chyba v programu, po jejímž odstranění se regulátor horkých vtoků plnohodnotně začlenil do výrobního procesu, včetně spolupráce s nadřazeným systémem.

Zařízení je již instalováno ve výrobním procesu, ale jeho vývoj nekončí. Dále se bude pracovat na doplňování nových funkcí, které se začali okamžitě nabízet po prvních zkušenostech s daným zařízením. Jedná se hlavně o diagnostické funkce odhalující poruchy vtokové soustavy.

# Literatura

- [1] **Hynek, Martin a kolektiv.** Katedra konstruování strojů. [Online] [Citace: 29. 11 2015.] [www.kks.zcu.cz/projekty-ver-fin/OPVK\\_PU/KA\\_05\\_publikace/KA05\\_Horke\\_vtoky.pdf](http://www.kks.zcu.cz/projekty-ver-fin/OPVK_PU/KA_05_publikace/KA05_Horke_vtoky.pdf). CZ.1.07/2.2.00/280056.
- [2] **EUROMAP, Technical commission of.** Protocol for Communication between Plastic Processing Machinery or Central Computer and Peripheral Equipment . *EUROMAP* . [Online] 17. 7 2008. [Citace: 20. 11 2015.] <http://www.euromap.org>. Version 1.2 March 2007.
- [3] **HTH8 s.r.o. MULTIBOX** . [Prospekt k výrobkům] Eimova 880, 572 01 Polička : HTH8 s.r.o.,.
- [4] **MASTERS, MOLD. MOLD MASTERS.** [Prospekt výrobků] místo neznámé : MOLD MASTERS, 2012. CZ7005-4.
- [5] **Zezulka, František, Bradáč, Zdenek, Fiedler, Petr, Kučera, Pavel, Štohl, Radek.** *Programovatelné automaty*. [Skripta PDF] Brno : Vysoké učení technické v Brně, FEKT, Ústav automatizace a měřicí techniky, 2003.
- [6] **Ronešová, Andrea.** Přehled protokolu MODBUS. [Online] Květen 2005. [Citace: 3. 3 2016.] Dostupné z WWW:<http://home.zcu.cz/~ronesova/bastl/files/modbus.pdf>.
- [7] **Ripka, Pavel; Kreidl, Marcel; Novák, Jiří; Ďaďo, Stanislav. SENZORY A PŘEVODNÍKY.** Praha : Vydavatelství ČVUT, 205.
- [8] **Bejček, Ludvík.** *Senzory neelektrických veličin*. [Skripta] Brno : Vysoké učení technické v Brně, FEKT, Ústav automatizace a měřicí techniky, 2009.
- [9] **Beneš, Petr. INTELIGENTNÍ SNÍMAČE.** Brno Kolejní 4, 612 00 : Vysoké učení technické v Brně, FEKT, Ústav automatizace a měřicí techniky.
- [10] **Bejček, Ludvík, Čejka, Miloslav a Rez, Jiří. Měření v elektrotechnice.** [Skripta PDF] Brno : VUT FEKT.
- [11] **Pivoňka, Petr. Číslicová řídicí technika.** [Skripta pdf] Brno : VUT FEKT, 2012.
- [12] **Balátě, Jaroslav. AUTOMATICKÉ ŘÍZENÍ.** Praha : BEN, 2003. ISBN 80-7300-020-2.
- [13] **Pivoňka, Petr a Schmidt, Michal.** Comparative Analysis of Discrete Derivative Implementations in PID Controllers. [Online] 25. 7 2007. [Citace: 20. 2 2016.] Dostupné z WWW: <http://www.wseas.us/e-library/conferences/2007csc/papers/561-186.pdf>.
- [14] **Cheng-Ching Yu.** *Autotuning of PID Controllers: A Relay Feedback Approach*. místo neznámé : Springer, 2007. ISBN-10: 1846280362.
- [15] **Blaha, Petr.** *Neparametrické metody identifikace*. [Přednášky z předmětu Modelování a identifikace] Brno : Vysoké učení technické v Brně, FEKT, Ústav automatizace a měřicí techniky, 24.9.2014.

- [16] **Noskievič, Petr.** *MODELOVÁNÍ A IDENTIFIKACE SYSTÉMU*. Ostrava : MONTANEX, 1999. ISBN 80-7225-030-2.
- [17] **ATMEL.** 8/16-bit AVR XMEGA A4 Microcontroller. *ATMEL*. [Online] 2013. [Citace: 6. 3 2016.] Dostupné z WWW: [http://www.atmel.com/Images/Atmel-8069-8-and-16-bit-AVR-AMEGA-A4-Microcontrollers\\_Datasheet.pdf](http://www.atmel.com/Images/Atmel-8069-8-and-16-bit-AVR-AMEGA-A4-Microcontrollers_Datasheet.pdf). 8069R-AVR-06/2013.
- [18] —. AVR1012: XMEGA A Schematic Checklist. *AVR1012: XMEGA A Schematic Checklist*. [Online] 2010. [Citace: 3. 3 2016.] Dostupné z WWW: <http://www.atmel.com/Images/doc8278.pdf>.
- [19] **SEMICONDUCTOR, DALLAS.** DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer. *Maxim*. [Online] 2015. [Citace: 6. 3 2016.] Dostupné z WWW: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>.
- [20] **MICROCHIP.** MCP3422/3/4 18-Bit, Multi-Chanel Analog-to-Digital Converter. [Online] 2008. [Citace: 15. 1 2016.] Dostupné z WWW: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/22088b.pdf>. DS22088B.
- [21] **Semiconductors, Philips.** *I2C MANUAL*. [PDF APPLICATION NOTE] místo neznámé : Philips Semiconductors, 2003. AN10216-01.
- [22] **Chioye, Luis.** RTD Ratiometric Measurements and Filtering. [Online] 3 2013. [Citace: 12. 2 2016.] Dostupné z WWW: <http://www.ti.com/lit/an/sbaa201/sbaa201.pdf>. SBAA201.
- [23] **ATMEL.** APPLICATION NOTE. *Atmel AVR1631: Single Phase Energy Meter using*. [Online] 10 2012. [Citace: 25. 1 2016.] Dostupné z WWW: <http://www.atmel.com/images/doc42039.pdf>.
- [24] **J&D.** Current Transformer JCXXF-XXXmA Series. *Current Transformer JCXXF-XXXmA Series*. [Online] [Citace: 1. 2 2016.] Dostupné z WWW: [http://http://www.hqsensing.com/download/3-1/1/\[3-1\]%20\\_1\\_1%20\(04\)%20JCXXF-XXXmA.pdf](http://http://www.hqsensing.com/download/3-1/1/[3-1]%20_1_1%20(04)%20JCXXF-XXXmA.pdf).
- [25] **Watlow.** SCR Power Control. *The Watlow Educational Series Book Six*. [Online] [Citace: 3. 2 2016.] Dostupné z WWW: [http://www.i-marshall.co.kr/catalog/watlow/w\\_con02/acrobat\\_user\\_manuals/WE6E\\_16.pdf](http://www.i-marshall.co.kr/catalog/watlow/w_con02/acrobat_user_manuals/WE6E_16.pdf).
- [26] **Watlow.** *SCR Power Theory Training Manual*. [Online] 2002. [Citace: 15. 1 2016.] Dostupné z WWW: <https://www.chromalox.com/-/media/files/training-manuals/en-us/tm-pk501-scr-power.pdf>.
- [27] **Watlow.** SCR Power Controllers. [Online] 2010. [Citace: 25. 2 2016.] Dostupné z WWW: <https://www.watlow.com/downloads/en/brochures/winscr0210.pdf>.
- [28] **LITEON.** LTV826S. *LTV826S*. [Online] [Citace: 22. 1 2016.] Dostupné z WWW: [http://www.soselectronic.hu/a\\_info/resource/d/ltv816.pdf](http://www.soselectronic.hu/a_info/resource/d/ltv816.pdf).

- [29] **TECHNOLOGY, LINEAR.** SN75176A. *SN75176A*. [Online] 1. 1 2015. [Citace: 15. 3 2016.] Dostupné z WWW: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn75176a.pdf>.
- [30] **ANALOG, DEVICES.** *Dual-Channel Digital Isolators*. [Online] 2015. [Citace: 5. 2 2016.] Dostupné z WWW: [http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADuM1200\\_1201.pdf](http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADuM1200_1201.pdf).
- [31] **TexasInstruments.**  $\mu$ A7800 SERIES POSITIVE-VOLTAGE REGULATORS. [Online] 1. 5 2003. [Citace: 5. 1 2016.] Dostupné z WWW: <https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/LM7805.pdf>.
- [32] **STMicroelectronics.** *DC-DC CONVERTER CONTROL CIRCUITS MC34063*. [Online] 2001. [Citace: 1. 2 2016.] Dostupné z WWW: <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/92977/STMICROELECTRONICS/MC3463.html>.
- [33] **Kostov, Konstantin, Kyyra, Jorma a Suntio, Teuvo.** *Analysis and Design of EMI Filters for DC-DC Converters*. místo neznámé : Helsinki University of Technology, Power Electronics Laboratory, 2003. ISBN 90-75815-07-7.
- [34] **Vrba, Kamil; Mišurec, Jiří; Zeman, Václav; Štěpán, Miroslav.** *Konstrukce elektronických zařízení-návrh plošných spojů*. [Skripta PDF] Brno : Vysoké učení technické v Brně, FEKT.
- [35] **Záhlava, Vít.** *Návrh a konstrukce desek plošných spojů*. Praha : Nakladatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-01-03351-1.
- [36] **Vrba, Kamil, Herman, Ivo a Kubánek, David.** *Konstrukce elektronických zařízení*. [Skripta PDF] Brno : Vysoké učení technické v Brně, FEKT.
- [37] **VUT.** *Koeficienty polynomickéaproximace*. [//ottp.fme.vutbr.cz/skripta/vlab/tabulky/Lint-t.htm] Brno : Vysoké učení technické v Brně.
- [38] **Beckman, Mike a Chioye, Luis.** Precision Thermocouple Measurement with the ADS1118. [Online] 6 2013. [Citace: 25. 1 2016.] Dostupné z WWW: <http://www.ti.com/lit/ug/slau509/slau509.pdf>.
- [39] **Wurker, Joachim.** RTD and Thermocouple Temperature Sensing using Delta Sigma Converters. [Online] [Citace: 15. 1 2016.] Dostupné z WWW: [http://c3162852.workcast.net/10216\\_Digikey\\_-\\_Temperature\\_Sensing\\_v2\\_201111119456.pdf](http://c3162852.workcast.net/10216_Digikey_-_Temperature_Sensing_v2_201111119456.pdf).
- [40] **Svačina, Jiří.** *ELEKTROMAGNETICKÁ KOMPATIBILITA*. [Skripta] Brno : Vysoké učení technické v Brně, FEKT, Ústav radioelektroniky, 2002.
- [41] **POWER, TRACO.** TME 0503S. [Online] [Citace: 10. 1 2016.] Dostupné z WWW: <http://www.mouser.com/ds/2/687/tme-519376.pdf>.

## Seznam použitých zkratk

PLC	Programmable logic controller – Programovatelný logický automat
DIN-lišta	Nosná lišta v elektrotechnice dle ČSN EN 60715.
CSV	Comma-separated values - hodnoty oddělené čárkami
EMC	Electromagnetic Compatibility - Elektromagnetická kompatibilita
EMI	Electromagnetic Interference - Elektromagnetické rušení
EMS	Electromagnetic Susceptibility - Elektromagnetická odolnost
DPS	Deska plošných spojů
POR	Power on reset – Reset při zapnutí
WDT	Watchdog timer – Hlídací časovač
ESD	ElectroStatic Discharge - Elektrostatický výboj a jeho vliv na elektroniku
SSR	Solid State Relay - polovodičové relé
MCU	Microcontroller Unit - Mikrokontrolér
SSD	Solid State Storage Device - Pevné paměťové zařízení
CPU	Central Processing Unit - Centrální procesorová jednotka
LED	Light Emitting Diode – Svítící dioda
ESR	Ekvivalentní sériový odpor je součet všech vnitřních odporů kondenzátoru změřený v ohmech.
RMS	Root-Mean-Square - efektivní hodnota napětí (proudu)
LSB	Last significant byte - Nejméně významný bajt
MSB	Most significant byte - Nejvíce významný bajt
PGA	Programmable gain amplifier - programovatelný předzesilovač
MTN	Měřicí transformátor napětí
MTP	Měřicí transformátor proudu
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
A/D	Analog to Digital – Analogovo digitální převodník
FIFO	First in first out – první dovnitř první ven
CRC	Cyclic Redundancy Check - cyklická redundantní kontrola
GND	uzemnění
ZN	Ziegler-Nichols

# Seznam příloh

Příloha 1 - CD obsahující:

- elektronickou verzi diplomové práce
- zdrojové kódy firmware měřicího modulu
- zdrojové kódy PC aplikace
- schéma zapojení měřicího modulu a DPS
- schéma zapojení silové části rozvaděče
- obrazová dokumentace
- soubory s naměřenými daty

Příloha 2 - Tabulka vstupních registrů měřicího modulů.....	104
Příloha 3 - Tabulka uchovávacích registrů měřicího modulu.....	105
Příloha 4 - Návrh DPS pohled ze strany součástek .....	106
Příloha 5 - Návrh DPS pohled ze spodní strany.....	106
Příloha 6 - Realizace rozvaděče vnitřní pohled .....	107
Příloha 7 - Instalace rozvaděče na vstříkovacím stroji HUSKY 2700 .....	107

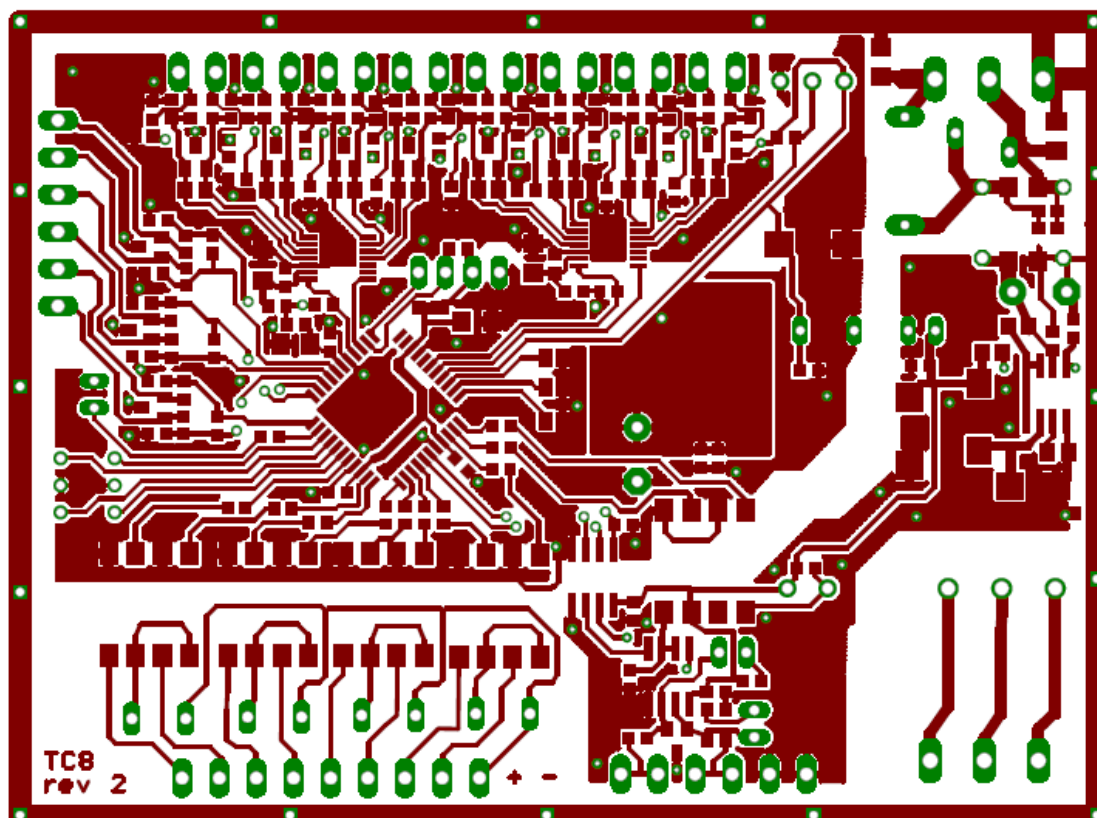
Teplota Zóna 1	R1		R2		Registr
	0x0000		0x0001		Adresa
	HI	LO	HI	LO	Byte
Teplota Zóna 2	R3		R4		Registr
	0x0002		0x0003		Adresa
	HI	LO	HI	LO	Byte
Teplota Zóna 3	R5		R6		Registr
	0x0004		0x0005		Adresa
	HI	LO	HI	LO	Byte
Teplota Zóna 4	R7		R8		Registr
	0x0006		0x0007		Adresa
	HI	LO	HI	LO	Byte
Teplota Zóna 5	R9		R10		Registr
	0x0008		0x0009		Adresa
	HI	LO	HI	LO	Byte
Teplota Zóna 6	R11		R12		Registr
	0x000A		0x000B		Adresa
	HI	LO	HI	LO	Byte
Teplota Zóna 7	R13		R14		Registr
	0x000C		0x000D		Adresa
	HI	LO	HI	LO	Byte
Teplota Zóna 8	R15		R16		Registr
	0x000E		0x000F		Adresa
	HI	LO	HI	LO	Byte
Porovnávací konec	R17				Registr
	0x0010				Adresa
	HI	LO			Byte
Napětí 1	R18		R19		Registr
	0x0011		0x0012		Adresa
	HI	LO	HI	LO	Byte
Napětí 2	R20		R21		Registr
	0x0013		0x0014		Adresa
	HI	LO	HI	LO	Byte
Napětí 3	R22		R23		Registr
	0x0015		0x0016		Adresa
	HI	LO	HI	LO	Byte

Příloha 2 - Tabulka vstupních registrů měřicího modulu

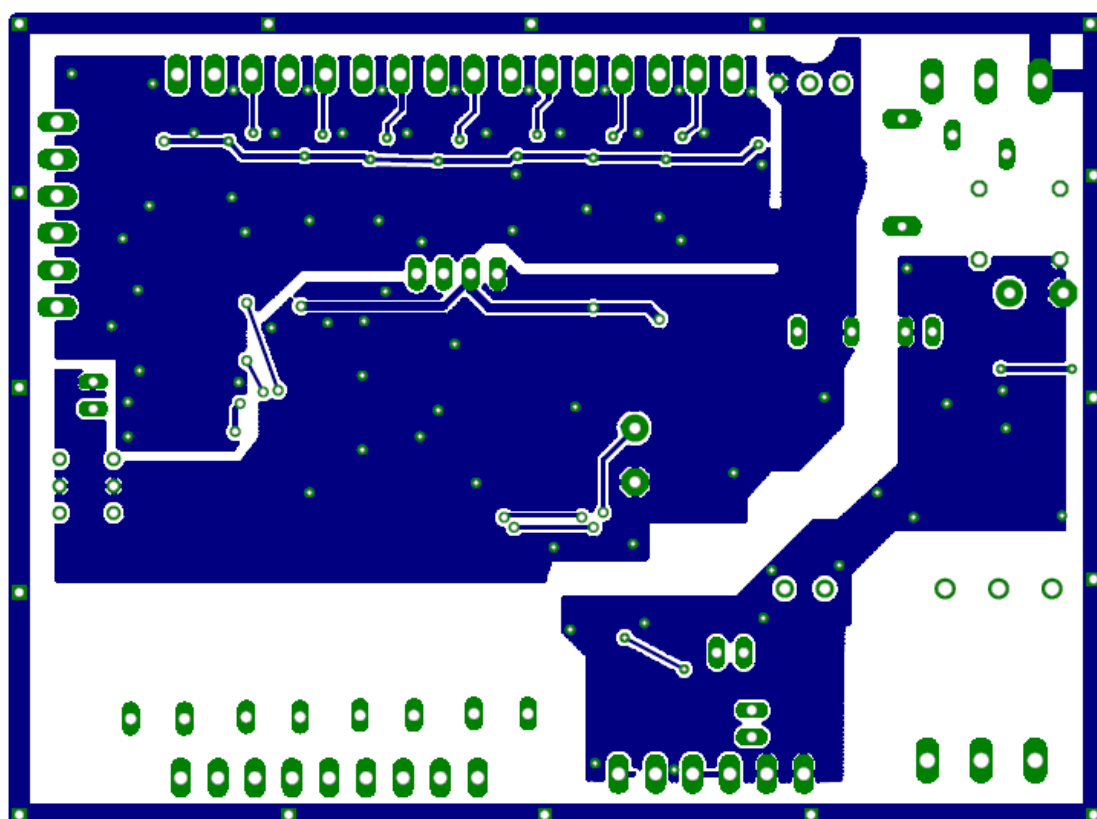


SSR zóna 1	R1		Registr
	0x0000		Adresa
	HI	LO	Byte
SSR zóna 2	R2		Registr
	0x0001		Adresa
	HI	LO	Byte
SSR zóna 3	R3		Registr
	0x0002		Adresa
	HI	LO	Byte
SSR zóna 4	R4		Registr
	0x0003		Adresa
	HI	LO	Byte
SSR zóna 5	R5		Registr
	0x0004		Adresa
	HI	LO	Byte
SSR zóna 6	R6		Registr
	0x0005		Adresa
	HI	LO	Byte
SSR zóna 7	R7		Registr
	0x0006		Adresa
	HI	LO	Byte
SSR zóna 8	R8		Registr
	0x0007		Adresa
	HI	LO	Byte
Relé	R9		Registr
	0x0008		Adresa
	HI	LO	Byte
Status bajt	R10		Registr
	0x0009		Adresa
	HI	LO	Byte
Velikost FIFO	R11		Registr
	0x000A		Adresa
	HI	LO	Byte
Komunikační rychlost	R12		Registr
	0x000B		Adresa
	HI	LO	Byte

Příloha 3 - Tabulka uchovávacích registrů měřícího modulu



Příloha 4 - Návrh DPS pohled ze strany součástek



Příloha 5 - Návrh DPS pohled ze spodní strany



Příloha 6 - Realizace rozvaděče vnitřní pohled



Příloha 7 - Instalace rozvaděče na vstřikovacím stroji HUSKY 2700