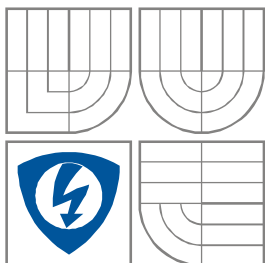


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNologiÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

ŘÍDICÍ JEDNOTKA PRO TEPELNÉ ČERPADLO

CONTROL UNIT FOR HEAT PUMP

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

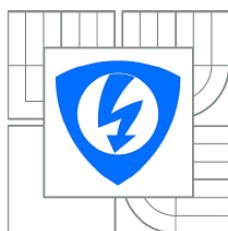
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Tomáš Kada

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Michal Hadinec, Ph.D.

BRNO, 2012



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Tomáš Kada
Ročník: 3

ID: 125472
Akademický rok: 2011/2012

NÁZEV TÉMATU:

Řídicí jednotka pro tepelné čerpadlo

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s principy tepelných čerpadel a způsobem jejich řízení. Porovnejte výhody a nevýhody existujících řídicích jednotek a navrhnete způsob řízení. Pro zpracování dat a řízení použijte mikrokontrolér AVR. Realizujte navrženou řídicí jednotku a ověřte její funkčnost, srovnajte ji s komerčně dostupnými řídicími jednotkami.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] CHLEBNÝ, J a kol. Automatizace a automatizační technika 3/Prostředky automatizační techniky. Brno: Computer Press, 2009. 296 s. ISBN 978-80-251-2523-6.

[2] TRUXA, J., SRDEČNÝ, K. Tepelná čerpadla. 1. vydání: Era - vydavatelství, 2005. 68 s. ISBN 80-7366-031-8.

Termín zadání: 6.2.2012

Termín odevzdání: 25.5.2012

Vedoucí práce: Ing. Michal Hadinec, Ph.D.

Konzultanti bakalářské práce:

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá optimální regulací tepelného čerpadla typu vzduch-voda pro vytápění rodinného domu. Je zde kladen důraz na dosažení maximální účinnosti, nejnižší pořizovací ceny regulátoru a nejdelší životnost čerpadla. Regulace je prováděna pomocí mikrokontroléru ATmega16, který získává data z několika teplotních čidel, obvodu reálného času a vnitřní jednotky s uživatelským rozhraním. Regulace je rozdělena do dvou částí – řízení samotného tepelného čerpadla a oběhového čerpadla teplé vody do radiátorů.

KLÍČOVÁ SLOVA

Regulace, tepelné čerpadlo, vytápění rodinného domu, mikrokontrolér.

ABSTRACT

This bachelor's thesis is interested in optimal regulation of air-water heat pump for heating the family house. The emphasis is reach the maximum efficiency, lowest cost and longest life of heat pump. The regulation is carried out by microcontroller ATmega16, which receives data from several temperature sensors, real-time clock circuit and indoor unit with user interface. The regulation is divided into two parts – control of heat pump and circulation pump floating hot water to radiators.

KEYWORDS

Regulation, heat pump, heating the house, microcontroller

KADA, T. *Řídicí jednotka pro tepelné čerpadlo*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 35 s. Vedoucí práce: ing. Michal Hadinec, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Řídicí jednotka pro tepelné čerpadlo jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrálního projektu 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 bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce ing. Michalu Hadincovi, Ph.D. za účinnou metodickou a pedagogickou pomoc. Dále děkuji ing. Martinu Friedlovi za odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne

.....

OBSAH

Seznam obrázků	viii
Seznam tabulek	x
Úvod	1
1 Problematika regulace tepelného čerpadla	2
1.1 Tepelné čerpadlo.....	2
1.1.1 Princip a účinnost tepelného čerpadla	2
1.1.2 Druhy tepelných čerpadel	4
1.2 Regulace.....	5
1.2.1 Statické a dynamické vlastnosti regulátoru	6
1.2.2 Stabilita regulátoru.....	7
1.3 Druhy regulátorů.....	7
1.3.1 Spojitý regulátor	7
1.3.2 Nespojitý regulátor	8
1.3.3 PID regulátor.....	9
1.3.4 PSD regulátor.....	13
1.3.5 Dvoustavový regulátor.....	15
1.4 Mikrokontrolér ATmega16.....	16
1.4.1 Základní parametry ATmega16:.....	16
2 Návrh regulace	18
2.1 Technické parametry tepelného čerpadla	18
2.2 Popis topné soustavy v domě.....	19
2.3 Blokové schéma zapojení mikrokontroléru	22
2.4 Srovnání dostupných řídicích jednotek na trhu	22
2.5 Návrh PSD regulace teploty vody v zásobníku topné vody	23
2.6 Návrh dvoustavové regulace domovní teploty	23
3 Návrh hardwaru	24
3.1 Napájecí zdroj	24
3.1.1 Použité součástky.....	25

3.2	Logická část	26
3.2.1	Obvod reálného času (RTC)	26
3.2.2	Teplotní čidla	26
3.2.3	D/A převodník	27
3.2.4	Displej	28
3.2.5	Spínač silové části.....	28
3.3	Návrh desky plošného spoje	29
4	Návrh softwaru	30
4.1	Algoritmus	30
4.1.1	Algoritmus regulace.....	30
4.2	Ovládání jednotky	31
4.3	Nastavení parametrů regulátoru.....	31
5	Závěr	32
	Literatura	33
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	34
	Seznam příloh	35

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1 Přibližné tlaky a teploty na různých místech TČ země-voda (teploty v závorkách pro TČ voda-voda) [2].....	2
Obr. 1.2 Grafické znázornění teoretického pracovního cyklu TČ [2].	3
Obr. 1.3 Domovní zapojení TČ vzduch-voda [4]	4
Obr. 1.4 Domovní zapojení TČ země-voda s podzemním kolektorem [4].....	5
Obr. 1.5 Otevřený regulační obvod [3].....	5
Obr. 1.6 Uzavřený regulační obvod [3]	6
Obr. 1.7 Blokové schéma spojitého regulátoru [3].....	7
Obr. 1.8 Blokové schéma nespojitého regulátoru [3]	8
Obr. 1.9 Princip vzorkování [3]	9
Obr. 1.10 Princip D/A převodu [3]	9
Obr. 1.11 Základní zapojení a přechodová charakteristika P regulátoru [3]	10
Obr. 1.12 Základní zapojení a přechodová charakteristika I regulátoru [3]	10
Obr. 1.13 Základní zapojení a přechodová charakteristika D regulátoru [3]	11
Obr. 1.14 Základní zapojení paralelního (a) a sériového (b) PID regulátoru [3]	12
Obr. 1.15 Přechodová charakteristika PID regulátoru [3]	13
Obr. 1.16 Spínací charakteristika dvoustavového regulátoru a) bez hystereze a b) s hysterezí	15
Obr. 1.17 Průběh regulované veličiny dvoustavového regulátoru s hysterezí.....	16
Obr. 1.18 Pinout ATmega16 TQFP/QFN/MLF [5].....	17
Obr. 2.1 Závislost teploty topné vody na venkovní teplotě (ekvitemní křivka).....	19
Obr. 2.2 Blokové schéma zapojení topné soustavy v domě	21
Obr. 2.3 Blokové schéma zapojení MCU	22
Obr. 3.1 Schéma zapojení spínače relé	28
Obr. 5.1 Schéma zapojení řídicí desky	I
Obr. 5.2 Schéma zapojení periférních obvodů	II
Obr. 5.3 Deska plošného spoje ze strany spojů	III
Obr. 5.4 Deska plošného spoje ze strany součástek	III
Obr. 5.5 Deska plošného spoje periférních obvodů.....	IV
Obr. 5.6 Osazovací výkres ze strany spojů.....	V

Obr. 5.7 Osazovací výkres ze strany součástek	V
Obr. 5.8 Průběh regulace teploty a výkonu v čase.....	VIII
Obr. 5.9 Časový průběh Integrační a proporcionální složky a výkonu při regulaci	VIII
Obr. 5.10 Fotografie experimentálního zapojení	IX

SEZNAM TABULEK

Tabulka 2.1: Elektrické parametry TČ	18
Tabulka 2.2: Kompresor	18
Tabulka 2.3 Ventilátor	18
Tabulka 2.4 Ostatní parametry TČ	19
Tabulka 2.5 Vlastnosti použitého chladiva (R410A).....	19
Tabulka 3.1: Parametry obvodu reálného času DS3231M [10].....	26
Tabulka 3.2: Parametry teplotního čidla DS7505 [10]	27
Tabulka 3.3: Parametry D/A převodníku MAX5811 [10].....	27
Tabulka 5.1 Seznam součástek	VI

ÚVOD

V dnešní době se stávají trendem alternativní způsoby vytápění budov. Používání kotle na tuhá paliva je fyzicky a prostorově náročné na skladování zásob (dřevo, uhlí atd.), je nutný častý zásah člověka a je velmi neekologické. Existuje mnoho způsobů automatizovaného a ekologického vytápění jako například elektrický přímotop (velmi neekonomický), plynový kotel nebo právě tepelné čerpadlo. Výhodou těchto systémů je automatizace celého procesu vytápění. Nevýhodou tepelného čerpadla je závislost na dodávce elektrické energie a zejména vysoká pořizovací cena. Jsou však k dispozici státní dotace na „zelené“ vytápění. Účelem této práce je navrhnout a sestavit ekvitermní regulátor pro tepelné čerpadlo typu vzduch-voda na vytápění rodinného domu. Původně bylo vytápění řešeno kotlem na tuhá paliva, které je nyní doplněno o tepelné čerpadlo. Důležité je navrhnout regulaci tak, aby využívala pokud možno co nejvyšší účinnosti tepelného čerpadla, která je závislá zejména na venkovní teplotě. Musí tedy brát v úvahu tento aspekt a pomocí získaných informací o teplotách v domě, venku, ve výměníku vody do radiátorů regulovat vnitřní teplotu.

Jádrem regulátoru je mikrokontrolér ATmega16. Regulace je rozdělena do dvou částí – udržování teploty vody v zásobníku topné vody pomocí PI regulace a dvoustavová regulace teploty v domě. Regulace teploty v domě je řízena podle teploty v referenční místnosti, protože na radiátorech nejsou instalovány elektronické ventily. Jejich cena je poměrně vysoká a v současné době nejsou finanční prostředky na jejich instalaci. S ohledem na nejdelší životnost čerpadla je třeba, aby nedocházelo k častým spínáním. Uživatelským rozhraním je displej a klávesnice, pomocí nichž je možno sledovat měřené teploty, aktuální výkon čerpadla, nastavovat konstanty regulace, upravovat vnitřní teplotu atd. Displej je doplněn o indikaci stavu, kdy se vlivem venkovních podmínek stává provoz čerpadla neekonomickým a je výhodné použít kotel na tuhá paliva. V dnešní době existuje celá řada podobných regulátorů od různých firem, jejich cena je však poměrně vysoká. Dalším požadavkem je tedy nízká pořizovací cena a univerzálnost regulátoru.

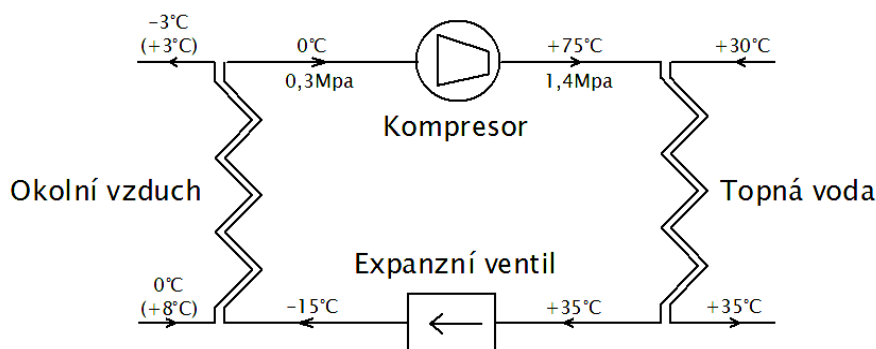
1 PROBLEMATIKA REGULACE TEPELNÉHO ČERPADLA

1.1 Tepelné čerpadlo

1.1.1 Princip a účinnost tepelného čerpadla

Tepelné čerpadlo (dále jen TČ) je zařízení, které funguje na principu odebírání tzv. nízkopotenciálního tepla z okolí a převedením jej do užitečné podoby. Zdroj nízkopotenciálního tepla mívá zpravidla nižší teplotu (běžně menší než 0°C), než voda v topném systému ($30 - 40^{\circ}\text{C}$).

Teplo z okolí se odebírá pomocí výměníku, nazývaném výparník, ve kterém koluje tzv. chladivo. To je do výparníku vstřikováno v kapalně podobě pomocí tzv. termostatického expanzního ventilu (TEV) pod vysokým tlakem. Ve výparníku je tlak nižší, což způsobí vypaření chladiva a tedy jeho ochlazení na nižší teplotu, než je teplota zdroje tepla. Ve výměníku se začne chladivo ohřívat na teplotu okolí. Ohřáté chladivo (relativně studené - o teplotě okolí, tedy např. i -10°C) je stlačováno kompresorem, čímž jeho teplota prudce vzroste. K přenášené energii se přidá i ztrátové teplo kompresoru. Na výtlaku kompresoru je umístěn sekundární výměník, tzv. kondenzátor, kterým proudí topná voda. Do kondenzátoru vstupuje chladivo o vyšší teplotě, než je teplota topné vody, chladivo zkapalní a předá energii topné vodě. Dále chladivo postupuje do expanzního ventilu a celý cyklus se stále opakuje.



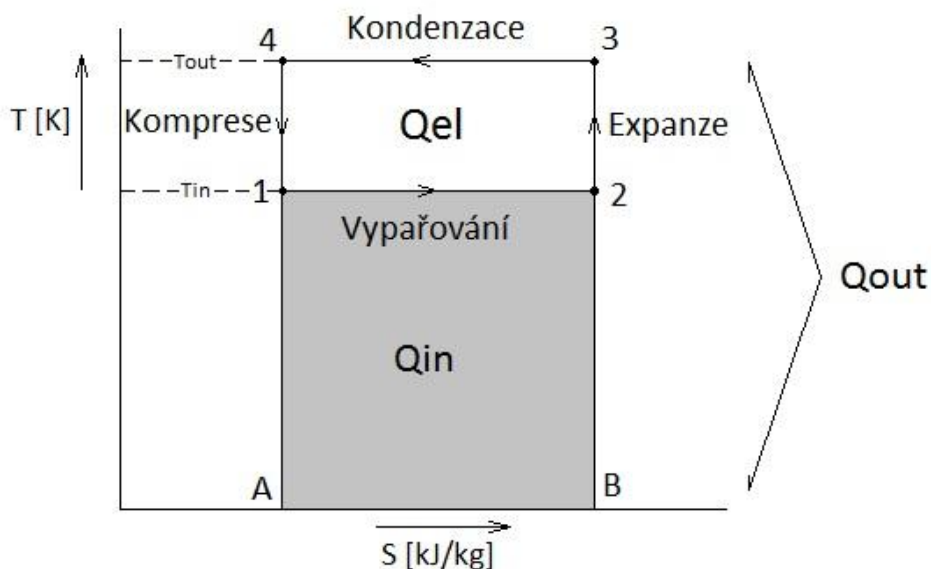
Obr. 1.1 Přibližné tlaky a teploty na různých místech TČ země-voda (teploty v závorkách pro TČ voda-voda) [2]

Celý děj pracuje na principech termodynamiky.

První termodynamická věta - Množství energie v uzavřené soustavě je konstantní. Energie může být proměněna jen v jinou formu, ale nemůže dojít k její ztrátě nebo nárůstu. [2]

Druhá termodynamická věta – Teplo se přenáší pouze z prostředí s vyšší teplotou do prostředí s nižší teplotou. [2]

Na obrázku je zobrazen pracovní cyklus čerpadla – tzv. T-S diagram nazývaný Carnotův cyklus.



Obr. 1.2 Grafické znázornění teoretického pracovního cyklu TČ [2].

Pracovní cyklus se skládá z následujících fází:

- 1-2 izotermické vypařování (vypařování při konstantní teplotě)
- 2-3 adiabatická (izentropická) komprese (při stálém tlaku)
- 3-4 izotermická kondenzace (kondenzace při stálé teplotě)
- 4-1 adiabatická (izentropická) expanze (při stálém tlaku)

Plocha A-1-2-B označená jako Q_{IN} je úměrná množství energie získané ze zdroje nízkopotenciálního tepla. Plocha 1-2-3-4 Q_{EL} je elektrická energie dodaná ze sítě. Platí $Q_{IN} > Q_{EL}$. Součet těchto ploch nám dává celkovou energii dodanou do topného systému.

Teplo – vnitřní energie tělesa způsobená pohybem molekul.

Teplota – okamžitý tepelný stav tělesa.

Nízkopotenciální teplo – tepelná energie o nízké teplotě, která se nehodí k přímému využití.

Chladivo – látka, která se lehce odpařuje a zkapalňuje. Používá se jako médium pro přenos tepla mezi zdrojem tepla a topnou soustavou. Musí mít vhodné chemické a termodynamické vlastnosti.

Termostatický expanzní ventil – ventil, přes který je vstřikováno chladivo z kondenzátoru do výparníku. Je řízen teplotou a tlakem v potrubí. [2]

1.1.2 Druhy tepelných čerpadel

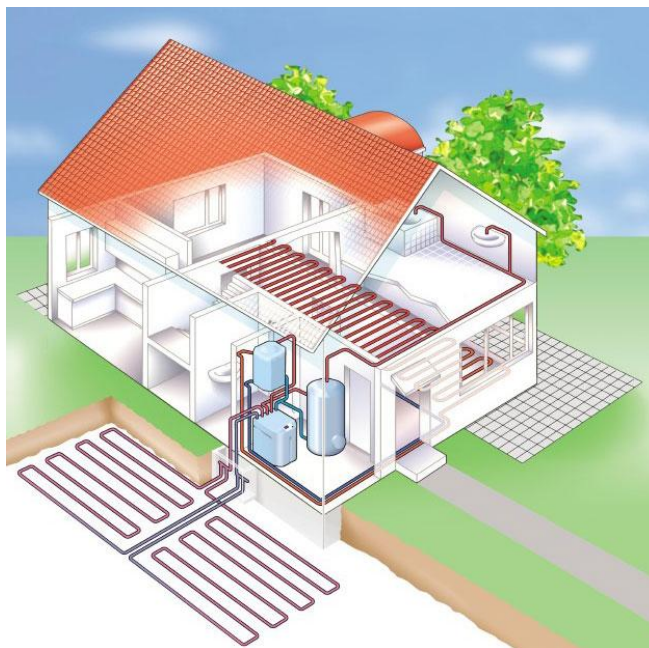
Existuje více druhů tepelných čerpadel, dělí se zejména podle druhu zdroje tepla a způsobu dodání tepla do objektu.

Vzduch/voda: Venkovní jednotka odebírá teplo z okolního vzduchu, který prochází skrz výparník ventilátor. Tento typ dosahuje nižší účinnosti zejména při hodně nízkých teplotách. Výkon tepelného čerpadla vzduch/voda by měl pokrývat 50 až 100 % tepelné ztráty při nejnižší místní výpočtové teplotě [1]. Mají nižší pořizovací cenu, nevhodné pro použití v horských oblastech.



Obr. 1.3 Domovní zapojení TČ vzduch-voda [4]

Země/voda: Teplo se odebírá ze zemního plošného kolektoru nebo vrtu. Tento typ dosahuje vyšší účinnosti. Výkon tepelného čerpadla země/voda by měl pokrývat 70 až 95% tepelné ztráty [1]. Nevýhodou je vysoká pořizovací cena a náročnost na velikost pozemku (zejména u plošného kolektoru). Výhodou je vyšší účinnost nezávislá na venkovní teplotě.

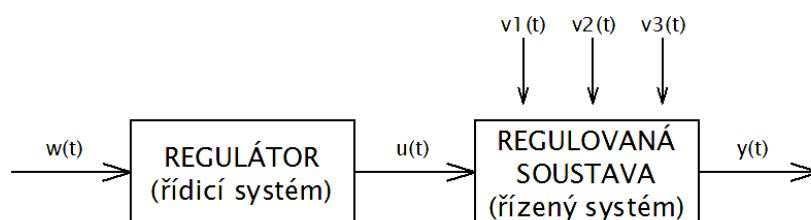


Obr. 1.4 Domovní zapojení TČ země-voda s podzemním kolektorem [4]

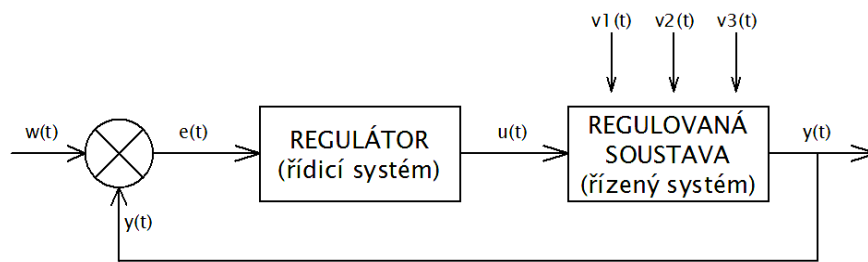
Existují také čerpadla, u kterých je nízkopotenciální teplo odebíráno z vodní nádrže (rybník, přehrada apod.). Používají se také čerpadla dodávající teplo do objektu prostřednictvím vzduchu (TČ typu voda-vzduch, vzduch-vzduch), které jsou schopny díky reverznímu chodu také ochlazovat vzduch v objektu (klimatizace).

1.2 Regulace

Regulace slouží k řízení jisté technické veličiny (teplota, tlak, otáčky apod.). Regulace se podle typu regulačního obvodu dělí na otevřenou a uzavřenou. Otevřená regulace „nevidí“ na **výstupní veličinu** y a regulace probíhá pouze v závislosti na **řídící veličině** w (žádané hodnotě) (viz. obr. 1.3). Regulátor tak není schopen reagovat na změny okolí a poruchy $v1(t) - v3(t)$. U uzavřeného regulačního obvodu (obráz. 1.4) je navíc zavedená zpětná vazba, která sleduje výstupní veličinu a určuje **regulační odchylku** e a pomocí ní pak upravuje **akční veličinu** u . Obvod tak reaguje na okamžitý stav výstupní veličiny a minimalizuje nepředvídatelné vlivy okolí a poruch.



Obr. 1.5 Otevřený regulační obvod [3]



Obr. 1.6 Uzavřený regulační obvod [3]

$$e = w - y \quad (1.1)$$

Jakmile rozdíl mezi regulovanou a žádanou hodnotou není nulový, regulátor zasáhne akční veličinou. Míra zásahu je závislá na velikosti odchylky a druhu regulátoru. Regulace je nutná zejména z důvodu setrvačnosti řízeného systému, působení chyb a vnějších vlivů $v1(t) - vx(t)$. [3]

1.2.1 Statické a dynamické vlastnosti regulátoru

Statické vlastnosti posuzují pouze stav regulace, kdy je výstupní veličina v ustáleném stavu. Statická charakteristika se určí tak, že výstupní veličinu po akčním zásahu se musí nechat ustálit a poté odečíst do charakteristiky.

Dynamické vlastnosti popisují právě změnu výstupní veličiny a její závislost na akční veličině. Tyto vlastnosti se vyjadřují pomocí:

- Vnějšího popisu systému
- Vnitřního popisu systému

Vnější popis

U vnějšího popisu se vyjadřují dynamické vlastnosti systému a neřeší se fyzikální podstaty veličin. Zkoumají se reakce výstupu na různých změnách vstupní veličiny. Vyjadřují se pomocí:

- diferenciální rovnice
- přenosu
- impulsní charakteristiky a funkce
- přechodové funkce a charakteristiky
- frekvenčního přenosu
- frekvenční funkce
- polohy pólů a nul

Vnitřní popis

Při vnitřním popisu systému se u vyjádření dynamických vlastností bere v potaz fyzikální a konstrukční podstata veličin. Tento popis tak daleko přesněji a složitěji popisuje funkci systému. [3]

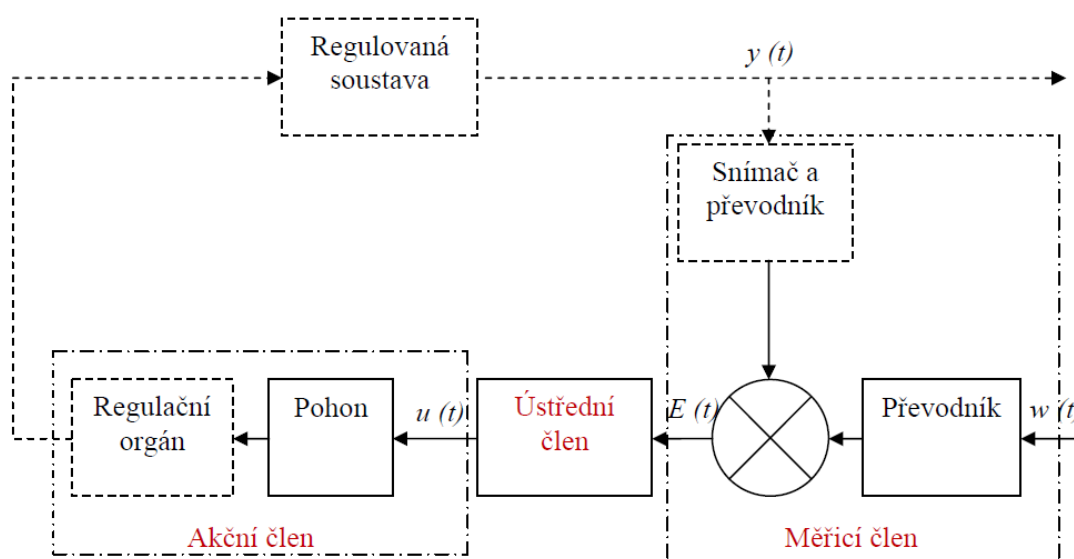
1.2.2 Stabilita regulátoru

Stabilita je základní a nejdůležitější vlastnost systému. Je nutné, aby při změně akční veličiny došlo po určité době k ustálení výstupní veličiny. Pokud by byl systém nestabilní, tak by se výstupní veličina rozkmitala. Stabilitu ovlivňujeme nastavením parametrů regulátoru. [3]

1.3 Druhy regulátorů

1.3.1 Spojitý regulátor

Tento typ regulátoru pracuje se spojitým signálem. Obvykle bývá složen z operačních zesilovačů a pasivních prvků, výstupní veličina má spojitý charakter. Jeho konstrukce je poměrně jednoduchá a funkčnost velice dobrá. Je základem regulační techniky.



Obr. 1.7 Blokové schéma spojitého regulátoru [3]

Základem jsou čtyři bloky – měřicí člen, ústřední člen, akční člen a samotná regulovaná soustava. [3]

Měřicí člen

Zjišťuje skutečnou hodnotu regulované veličiny $y(t)$ a řídicí veličinu $w(t)$ a z nich určuje regulační odchylku $E(t)$. Skládá se z čidla měřené veličiny (například teplotní čidlo) a jeho převodníkem na napětí, převodníkem vstupní žádané veličiny a součtového

členu. Přesnost Měřicího členu nemůže být větší, než je přesnost čidla.

Ústřední člen

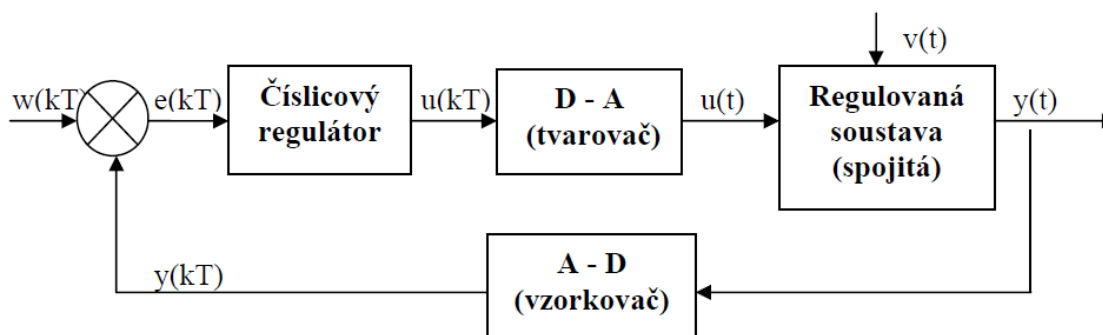
Má za úkol upravit regulační odchylku. A to pomocí zesílení, derivace nebo integrace. Tento člen má zásadní vliv na celou regulaci. Jeho vlastnosti lze volit a měnit pomocí parametrů regulátoru. Ústřední člen určuje dynamické, statické vlastnosti a stabilitu.

Akční člen

Jeho základem je tzv. pohon, který dodává energii do regulačního orgánu (tepelnou, změna otáček apod.) U regulačního orgánu je ve většině případů požadována lineární závislost na velikosti akční veličiny. Pohon může být například zdroj elektrické energie a regulační orgán topná spirála. [3]

1.3.2 Nespojité regulátor

Základem nespojitého (neboli diskrétního) regulátoru je číslicová jednotka například mikrokontrolér. Ten provádí regulaci pomocí naprogramovaného algoritmu. Výsledkem je výstupní veličina v číslicové podobě, kterou lze pomocí A/D převodníku převést na spojitou veličinu.



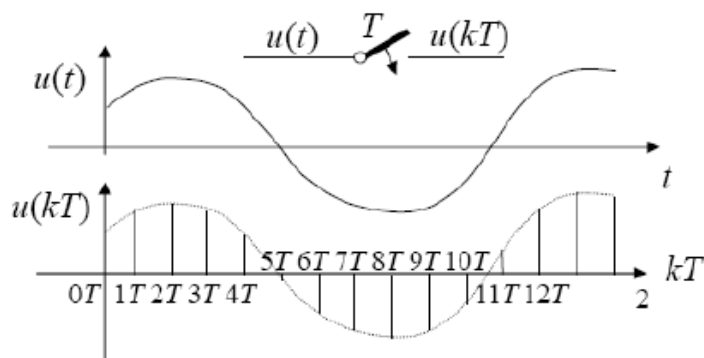
Obr. 1.8 Blokové schéma nespojitého regulátoru [3]

Nespojitý regulační obvod se skládá z A/D převodníku, D/A převodníku, číslicového regulátoru a regulované soustavy (spojité). Výstupem této soustavy je spojitá regulovaná veličina $y(t)$, která je snímána s frekvencí f a převáděna do digitální podoby $y(kT)$ pomocí A/D převodníku, kde T je perioda vzorkování. Tato veličina je přiváděna spolu s řídicí veličinou $w(kT)$ do číslicového regulátoru, který na základě regulační odchylky $e(kT)$ a naprogramovaného algoritmu vypočítá a provede akční zásah $u(kT)$. Tato hodnota je převedena pomocí D/A převodníku na analogovou (spojitou) hodnotu $u(t)$, která působí pomocí regulačního orgánu na regulovanou soustavu. V některých případech se nepřevádí $u(kT)$ na spojitý signál a regulovaná soustava je řízená pomocí PWM signálu (Pulse-Width Modulation - pulsně šířková modulace). [3]

A/D převodník

Slouží k převodu spojitého signálu na diskrétní. V určitých časových intervalech (vzorkovací perioda T) provádí vzorkování a následně kvantování vstupního signálu. Tím se převede analogová hodnota do digitální podoby. Musí být ovšem splněna Shannonova podmínka, která říká, že vzorkovací kmitočet musí být alespoň dvojnásobný oproti nejvyšší vzorkované frekvenci (1.2). Pokud není tato podmínka splněna, dochází aliasingu (prolínání frekvenčních spekter). [3]

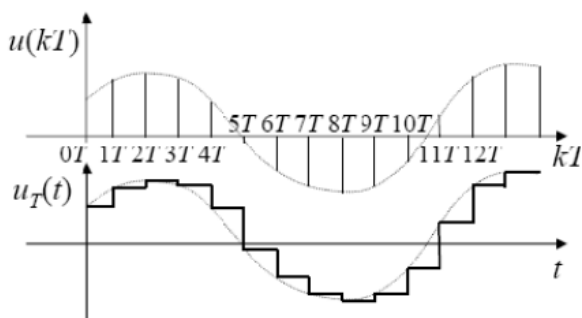
$$f_{VZ} \geq f_{MAX} \quad (1.2)$$



Obr. 1.9 Princip vzorkování [3]

D/A převodník

Slouží k převodu digitálního signálu na analogový, který je důležitý pro předání energie do následujícího členu obvodu. Digitální signál totiž obsahuje pouze informaci, která je nevhodná pro zpracování v analogových obvodech. [3]



Obr. 1.10 Princip D/A převodu [3]

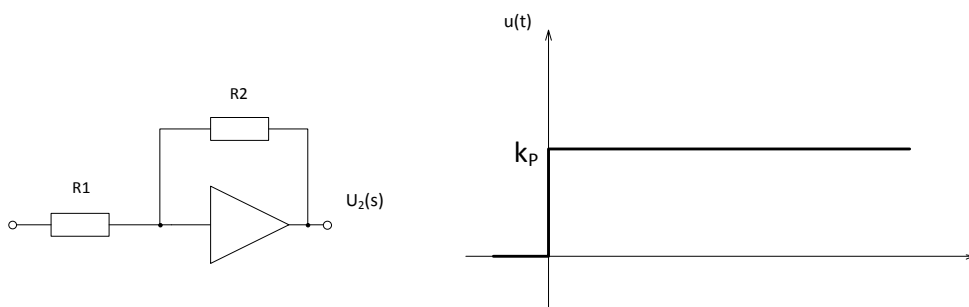
1.3.3 PID regulátor

Jedná se o spojitý regulátor, kdy se regulační odchylka může zesilovat (proporcionální složka P), derivovat (derivační složka D) nebo integrovat (integrační složka I). Podle použitých složek se dělí regulátory na P, I, PI, PD nebo PID.

Regulátor P

Nejjednodušší typ regulátoru je právě proporcionální. Jeho jediným parametrem je zesílení r_0 . Zesílení je závislé na okamžité hodnotě regulační odchylky $e(t)$. Čím vyšší odchylka, tím větší je i akční zásah $u(t)$. Zesílení může být velmi vysoké, aniž by byla ohrožena stabilita samotného regulátoru. Je vhodný pro stabilizaci pevných bodů (teplota, napětí, proud, apod.). Nevýhodou proporcionálního regulátoru je trvalá regulační odchylka.[3]

$$u(t) = r_0 \cdot e(t) \quad (1.3)$$



Obr. 1.11 Základní zapojení a přechodová charakteristika P regulátoru [3]

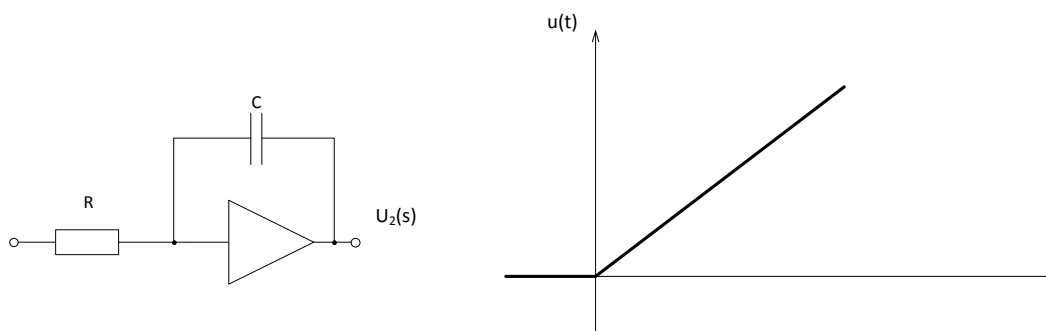
Regulátor I

Jedná se o komplikovanější regulátor, u kterého je velikost akčního zásahu $u(t)$ úměrná hodnotě časového integrálu regulační odchylky $e(t)$. Jeho parametrem je T_i .

$$T_i = \frac{r_0}{r_I} \quad (1.4)$$

,kde r_I je konstanta úměrnosti

Čím větší je hodnota T_i , tím menší je vliv regulátoru I na hodnotu akční veličiny. Při regulování proporcionální soustavy integračním regulátorem je možné dosáhnout nulové regulační odchylky $e(t)$. Integrační regulátory jsou náchylnější na kmitání a tedy snižují stabilitu regulace. Stabilita se v praxi zajišťuje použitím integračního regulátoru v kombinaci s proporcionálním. [3]

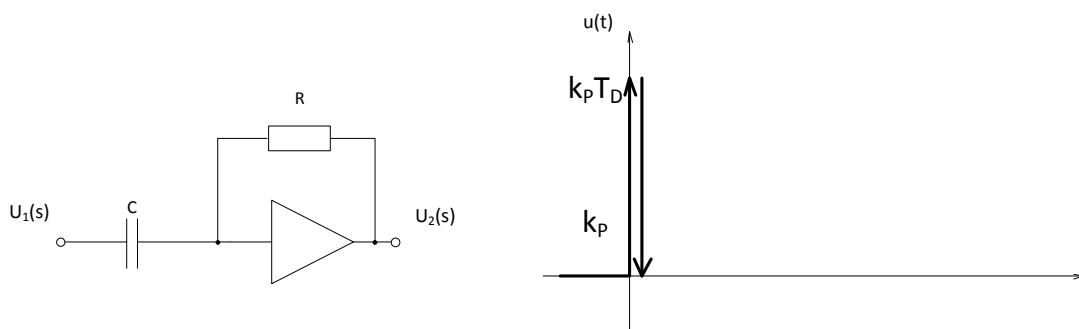


Obr. 1.12 Základní zapojení a přechodová charakteristika I regulátoru [3]

Regulátor D

Derivační regulátor je matematicky obdobně složitý jako integrační. Velikost jeho akčního zásahu je dána časovou derivací (rychlostí změny) regulační odchylky $e(t)$. Konstanta úměrnosti je označena jako r_d , nebo jako časová konstanta T_d .

V praxi není možné sestavit samotný derivační regulátor z důvodu jeho zesilování šumových signálů, neschopnosti regulování ustálené hodnoty (derivace konstanty je rovna nule) a náchylnosti na rozkmitání při prudké změně regulační odchylky, soustava by tak byla nestabilní.



Obr. 1.13 Základní zapojení a přechodová charakteristika D regulátoru [3]

Regulátor PID

Obsahuje všechny regulační složky - proporcionální, derivační i integrační. Akční zásah je tedy závislý na regulační odchylce, její derivace a integrace v čase.

Základní složkou je proporcionální. Ta určuje velikost zásahu na základě regulační odchylky. Pro úplné odstranění regulační odchylky slouží integrační složka, která se přičítá k zásahu, dokud není odchylka nulová. Integrační složka však snižuje stabilitu systému. Pro udržení stability a zrychlení regulačního děje se používá derivační složka. Ta reaguje na změnu regulační odchylky – čím větší změna, tím větší zásah. Matematický popis PID regulátoru znázorňuje rovnice (1.5). [3]

$$u(t) = r_0 \cdot e(t) + r_I \cdot \int e(t)dt + r_d \cdot e'(t) \quad (1.5)$$

Přenos PID regulátor je dán

$$G_R(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = r_0 + \frac{r_I}{s} + r_d s \quad (1.6)$$

, kde $U(s)$ je výstup regulátoru a $E(s)$ vstup v Laplaceově obraze, r_0 , r_I a r_d jsou proporcionální, integrační a derivační konstanta a jejich velikost určuje míru zásahu dané složky.

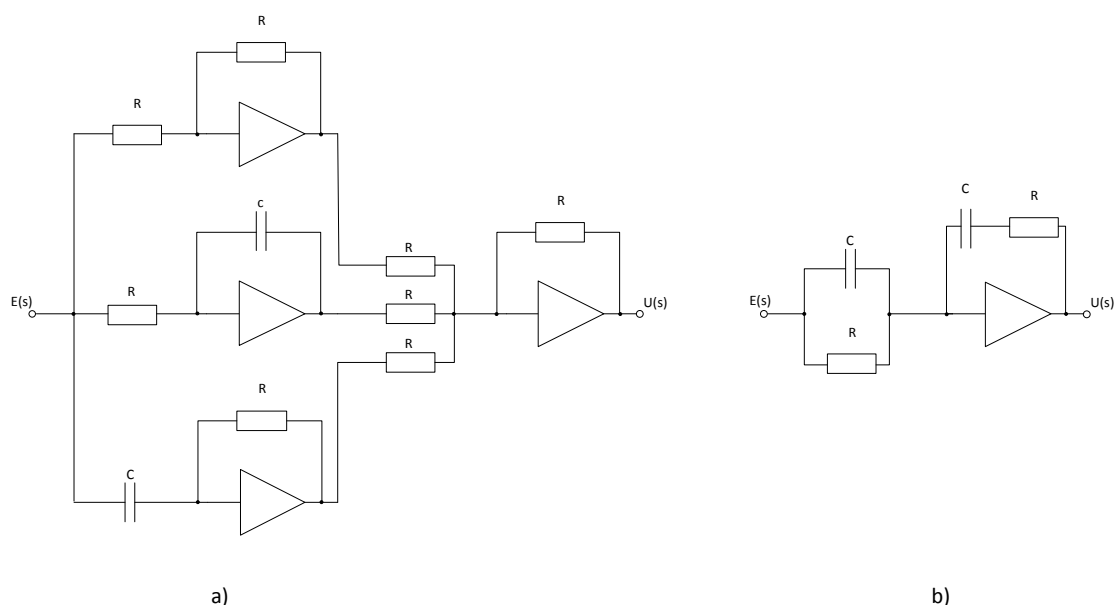
Častěji používaný tvar rovnice

$$G_R(s) = \left(1 + \frac{1}{\frac{r_0}{r_i}} + \frac{r_i}{r_0} s \right) = r_0 \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot s} + T_d \cdot s \right) \quad (1.7)$$

, kde r_0 je bezrozměrná proporcionální konstanta, T_i představuje integrační konstantu v sekundách a T_d derivační konstantu v sekundách.

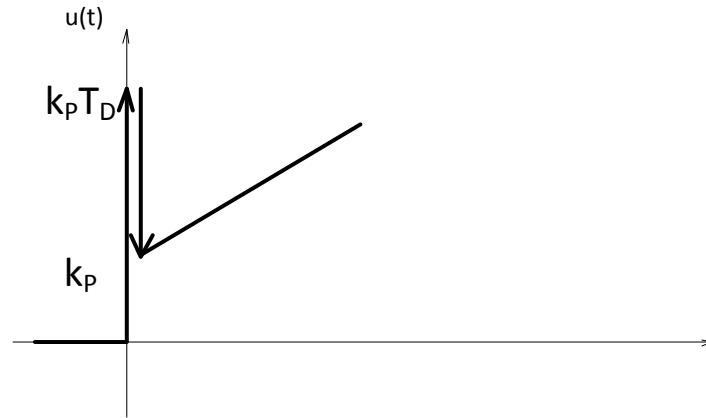
Místo zesílení r_0 se často používá tzv. pásmo proporcionality (PP), které udává, o kolik procent v celém rozsahu se musí změnit vstupní signál regulátoru, aby se výstup změnil v celém svém rozsahu. Závislost udává vztah (1.8). [3]

$$pp = \frac{1}{r_0} \cdot 100 [\%] \quad (1.8)$$



Obr. 1.14 Základní zapojení paralelního (a) a sériového (b) PID regulátoru [3]

Na obrázku 1.14a je zobrazen paralelní neboli neinteraktivní zapojení PID regulátoru, neboť každá složka (P, I a D) jsou nastavitelné zvlášť a navzájem se neovlivňují. Naopak na obrázku 1.14b je schéma sériového, tedy interaktivního zapojení regulátoru, kdy se jednotlivé složky navzájem ovlivňují. Tedy např. nastavením derivační složky T_d se ovlivňuje také integrační složka T_i . Paralelní zapojení je tedy jednodušší na nastavení, v praxi se ale většinou vyrábí sériové zapojení z důvodu jednoduššího obvodového zapojení. [3]



Obr. 1.15 Přebodová charakteristika PID regulátoru [3]

1.3.4 PSD regulátor

Každá složka regulátoru má také svou číslicovou podobu. Značení jednotlivých složek je obdobné – proporcionální P, sumační S (číslcová verze integrační) a diferenční D (obdoba analogové derivační). Spojením všech tří složek se získá PSD regulátor (proporcionálně sumačně diferenční). Od PSD regulátoru je očekávána stejná funkce, matematický zápis proto vychází ze vztahu pro PID regulátor (1.6), ze kterého se vytkne r_0 a tím se získá tvar s časovými konstantami (1.9). [3]

$$u(t) = r_0 \cdot \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (1.9)$$

S přenosem

$$G_R(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = r_0 \cdot \left[1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right] \quad (1.10)$$

Číslicová verze PID regulátoru se získá nahrazením integrálu sumací (1.11) a derivaci zpětnou diferencí (1.13)

$$\int_0^t e(t) dt \rightarrow T \cdot \sum_i^k e(iT) \quad (1.11)$$

$$\frac{de(t)}{dt} \rightarrow \frac{\nabla e(kT)}{T} \quad (1.12)$$

, kde $\nabla e(kT)$ je zpětná diference definována vztahem (1.13)

$$\nabla e(kT) = e(kT) - e[(k-1)T] \quad (1.13)$$

U tohoto algoritmu se integrál nahradí sumací a derivace diferencí a vznikne tak polohový PSD regulátor. Častěji používaným tvarem je přírůstkový algoritmus, kde se neurčuje okamžitá hodnota akčního zásahu $u(kT)$, ale přírůstek (změna) zásahu oproti předchozímu zásahu $u[(k-1)T]$. Diferenční rovnice pro diskrétní čas $u[(k-1)T]$ je vyjádřena vztahem [3]

$$u[(k-1)T] = r_0 \cdot [e[(k-1)T] + \frac{T}{T_i} \sum_{i=1}^{k-1} e(iT) + \frac{T_d}{T} \nabla e[(k-1)T]] \quad (1.14)$$

Diferenční rovnice pro diskrétní čas (kT) je dána vztahem

$$u(kT) = r_0 \cdot [e(kT) + \frac{T}{T_i} \sum_{i=1}^k e(iT) + \frac{T_d}{T} \nabla e(kT)] \quad (1.15)$$

Rozdíl (1.15) a (1.14) je potom dán

$$\nabla u(kT) = r_0 \cdot [\nabla e(kT) + \frac{T}{T_i} \nabla e(kT) + \frac{T_d}{T} \nabla^2 e(kT)] \quad (1.16)$$

, kde

$$\nabla^2 e(kT) = \nabla e(kT) - \nabla e[(k-1)T] = e(kT) - 2e[(k-1)T] + e[(k-2)T] \quad (1.17)$$

Dosazením a konečnou úpravou získáme konečný tvar PSD regulátoru

$$u(kT) = u[(k-1)T] + q_0 e(kT) + q_1 e[(k-1)T] + q_2 e[(k-2)T] \quad (1.18)$$

Přenos pomocí Z transformace

$$G_R(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = \frac{q_0 + q_1 z^{-1} + q_2 z^{-2}}{1 - z^{-1}} \quad (1.19)$$

, kde

$$q_0 = r_0 \left(1 + \frac{T}{T_i} + \frac{T_d}{T} \right), \quad (1.20)$$

$$q_1 = -r_0 \left(1 + 2 \cdot \frac{T_d}{T} \right), \quad (1.21)$$

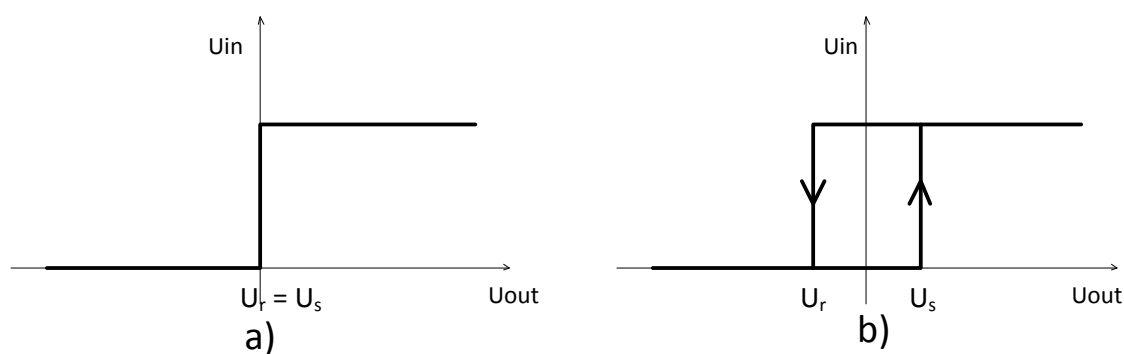
$$q_2 = r_0 \frac{T_d}{T} \quad (1.22)$$

Vztahy převzaty z [3]

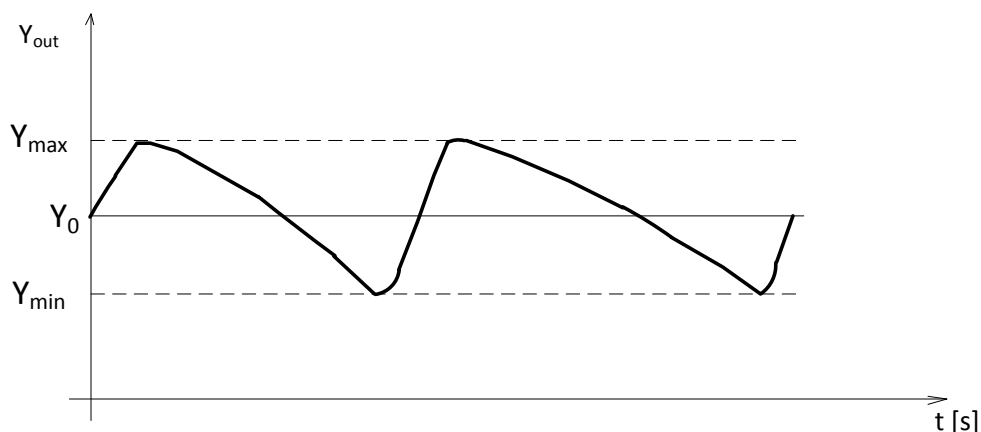
Podobným způsobem lze převést i ostatní regulátory z analogové do digitální podoby. [3]

1.3.5 Dvoustavový regulátor

V mnohých aplikacích se používají soustavy, které jsou řízeny pouze dvoustavově. Akční zásah se tedy provádí v plné míře nebo vůbec – zapnuto/vypnuto. U takového systému jsou větší regulační chyby. Tato regulace se používá například u regulace chlazení pomocí větráčku. Dosáhne-li teplota zařízení určité hodnoty, větráček se sepne, po ochlazení opět vypne. Problém může nastat při spínací teplotě, která se rovná rozpínací $U_r = U_s$. U systémů s malým dopravním zpožděním se může systém rozkmitat a rychle za sebou spínat a rozpínat. Což může být nežádoucí například u motorů, relé, kompresorů nebo čerpadel. Zavádí se proto do obvodu hystereze, kdy je spínací hodnota U_s vyšší než rozpínací U_r viz. obrázek 1.16. Tím se docílí toho, že spínání a rozepínání není tak časté, ale vzniká zde větší chyba. Regulovaná veličina se pohybuje v hodnotách okolo žádané Y_0 v rozmezí hystereze Y_{min} a Y_{max} , průběh je naznačen na obrázku 1.17. Jednoduchý dvoustavový regulátor lze realizovat pomocí operačního zesilovače zapojeného jako komparátor, kde zpětná vazba způsobí hysterezi.



Obr. 1.16 Spínací charakteristika dvoustavového regulátoru a) bez hystereze a b) s hysterezí



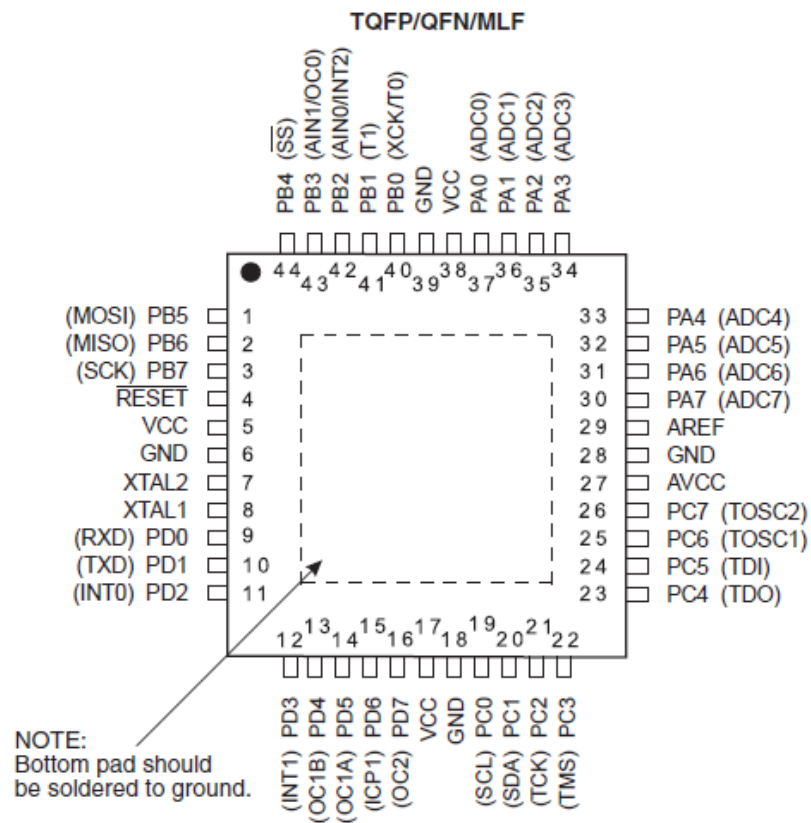
Obr. 1.17 Průběh regulované veličiny dvoustavového regulátoru s hysterezí

1.4 Mikrokontrolér ATmega16

ATmega16 je 8-bitový mikrokontrolér firmy ATmel s architekturou typu RISC obsahující mnoho periférií.

1.4.1 Základní parametry ATmega16:

- 8-bitový mikrokontrolér
- 4 vstupně-výstupní 8-bitové porty
- 16kB flash
- 512B EEPROM
- 1kB SRAM
- 32 8-bitových pracovních registrů
- Dva 8-bitové a jeden 16-bitový časovač/čítač s nastavitelným módem a předděličkou
- 4 PWM kanály
- 8-kanálový 10-bitový AD převodník
- Dvouvodičové sériové rozhraní
- Programovatelné USART a TWI rozhraní
- JTAG a SPI rozhraní pro sériové programování v systému
- Analogový komparátor
- Watchdog oscilátor
- Napájecí napětí – 4.5 – 5.5 V
- Interní oscilátor s kmitočtem 0 – 16 MHz
- Pouzdra: 40-pin PDIP, 44-lead TQFP a 44-pad QFN/MLF [5]



Obr. 1.18 Pinout ATmega16 TQFP/QFN/MLF [5]

2 NÁRVH REGULACE

2.1 Technické parametry tepelného čerpadla

Jedná se o tepelné čerpadlo typu vzduch-voda firmy Fujitsu. Jeho základní parametry jsou uvedeny v následujících tabulkách.

Tabulka 2.1: Elektrické parametry TČ

Vnitřní jednotka		ARYA45LATN
Venkovní jednotka		AOYA45LATL
Chladicí výkon		12.5 kW
Topný výkon		14 kW
Napájení		230 V/50 Hz
Provozní proud	Chlazení	17 A
	Topení	16.5 A
Vstupní výkon	Chlazení	3.89 kW
	Topení	3.77 kW
E.E.R.	Chlazení	3.21 kW/kW
	Topení	3.71 kW/kW
Startovací proud		15 A
Odvlhčování		3.5 l/hod
Venkovní cirkulace vzduchu		6600 m ³ /hod

Tabulka 2.2: Kompresor

Typ	Hermetický, měnící, 4-polový, 3-fázový, DC motor, dvojitý rotační
Označení	DA420A3F-21ZA
Chladivo R410A	3,35g

Tabulka 2.3 Ventilátor

Označení	MFE-60PO
Horní ventilátor	850 ot/min
Spodní ventilátor	750 ot/min

Tabulka 2.4 Ostatní parametry TČ

Hlučnost	Chlazení	55 dB
	Topení	56 dB
Rozměry venkovní jednotky VxŠxH		1290 x 900 x 330 mm
Hmotnost čistá/hrubá		107 kg / 98 kg

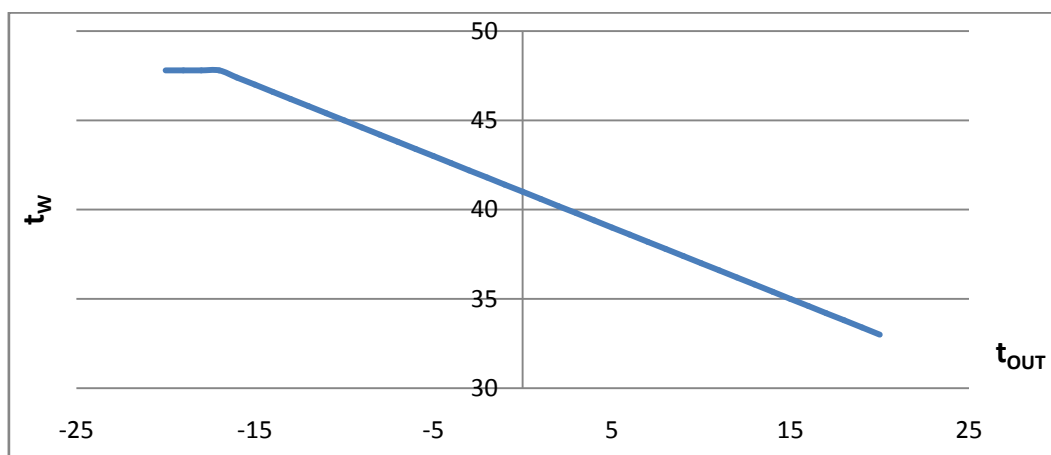
Tabulka 2.5 Vlastnosti použitého chladiva (R410A)

Max délka potrubí		50 m
Max výška potrubí		30 m
Množství chladiva pro délku potrubí	20 m	3350 g
	30 m	3850 g
	40 m	4350 g
	50 m	4850 g
Přídavné chladivo		50 g/m

Tabulky převzaty z [6].

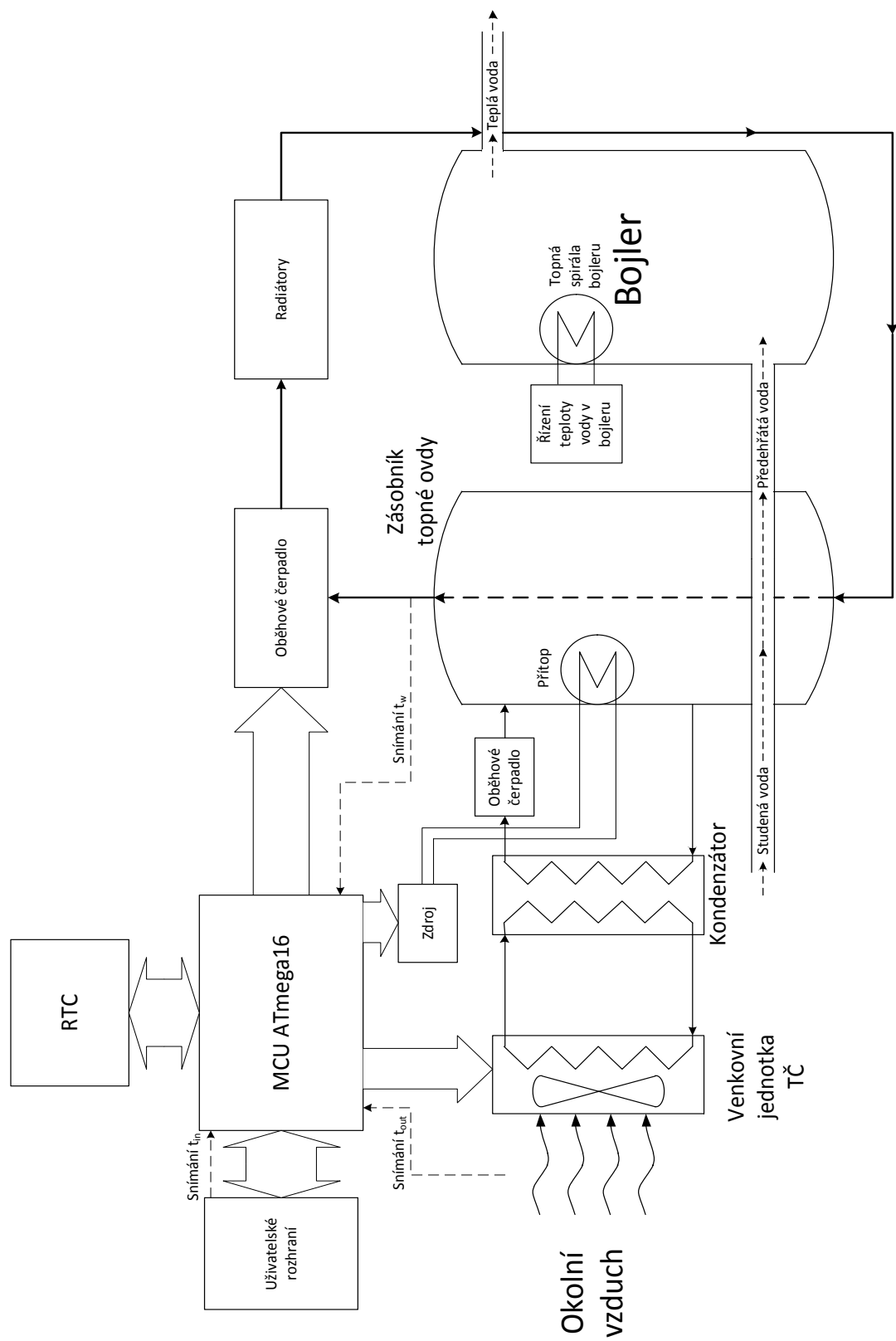
2.2 Popis topné soustavy v domě

Regulátor je navržen pro rodinný dům, ve kterém je původně vytápění zajištěno pomocí kotle na tuhá paliva, doplněným o tepelné čerpadlo typu vzduch-voda. Při normálním provozu je vytápění celkově pokryto tepelným čerpadlem. Při poruše (výpadek sítě, porucha na zařízení) nebo při neekonomičnosti provozu TČ (tj. při velmi nízkých teplotách $< -17^{\circ}\text{C}$) je k vytápění použit kotel na tuhá paliva. Konkrétní návrh zapojení topné soustavy je na obrázku 2.2. Soustava se skládá z vnitřní a vnější části. Jedinou vnější jednotkou je samotné tepelné čerpadlo, zbytek je umístěn v budově ve sklepní části domu.



Obr. 2.1 Závislost teploty topné vody na venkovní teplotě (ekvitemní křivka)

Z venkovní jednotky tepelného čerpadla je kompresorem poháněno chladivo do vnitřního kondenzátoru, kde chladivo předá teplo vodě, která je poháněna pomocí oběhového čerpadla do zásobníku topné vody (dále jen TV), kde se udržuje teplota, která je závislá na venkovní teplotě, jak naznačuje obrázek 2.1. Závislost byla získána na základě tepelného auditu a empirických znalostí. Čím nižší je venkovní teplota, tím vyšší musí být teplota TV, aby se budova stíhala vytápět. Závislost má své meze, kdy vytápění nad cca 46°C není ekonomické a pod 30°C by nebylo vytápění účinné. Pro případ, kdy čerpadlo nedokáže vytopit vodu na potřebnou hodnotu (např. z důvodu velmi nízké venkovní teploty), je uvnitř zásobníku topná spirála, která dotápí na žádanou teplotu. Zahřátá voda z tohoto zásobníku je poháněna oběhovým čerpadlem do radiátorů, které vyhřívají místnosti v domě. Zásobník TV plní rovněž funkci předeřívání studené obecní pitné vody tekoucí do bojleru. Uvnitř bojleru je umístěna topná spirála, která dohřívá a udržuje teplotu vody na žádané hodnotě. Teplota vody v zásobníku TV je tedy závislá nejen na venkovní teplotě, ale také na nastavené teplotě uvnitř budovy, čím vyšší teplota, tím déle musí být zapnuto oběhové čerpadlo a tím více tepla je ze zásobníku odebráno. Dále je teplota ovlivněna odběrem teplé vody.

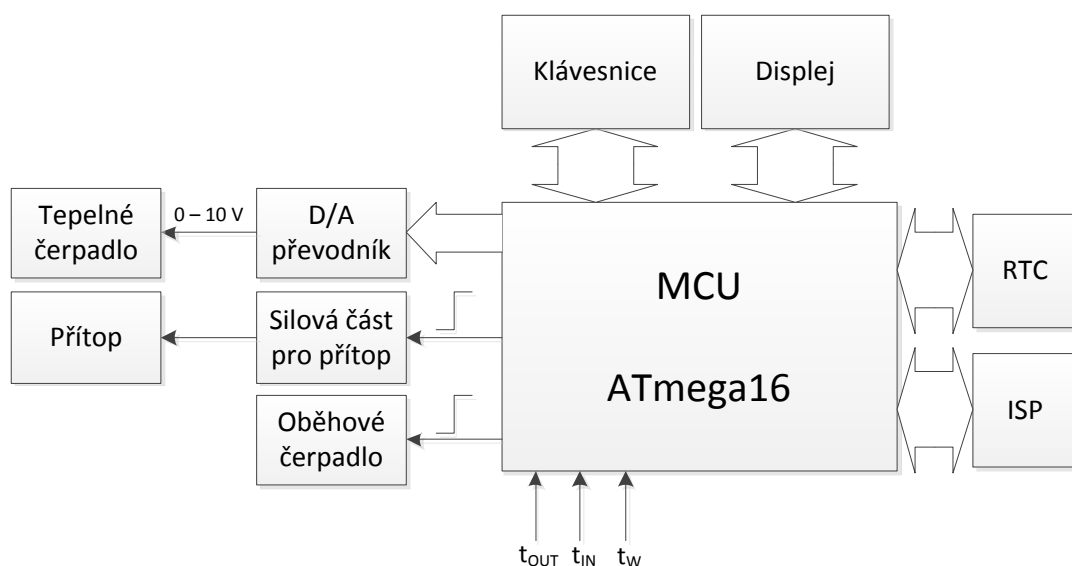


Obr. 2.2 Blokové schéma zapojení topné soustavy v domě

Předmětem této práce je právě regulace teploty v zásobníku TUV a oběhového čerpadla vody do radiátorů. Tepelné čerpadlo obsahuje svou vlastní řídicí elektroniku, která obstarává chod kompresoru, expanzního ventilu, ventilátorů, obsluhu reverzního chodu během rozmrazování apod. Oběhové čerpadlo mezi kondenzátorem a zásobníkem se spíná automaticky při chodu tepelného čerpadla.

2.3 Blokové schéma zapojení mikrokontroléru

Mikrokontrolér ATmega16 je zapojen podle obrázku 2.3. Přes vstupně/výstupní porty je zapojena klávesnice, displej, obvod reálného času (RTC), rozhraní pro ISP, teplotní čidla, silová část pro ovládání přítoku, řízení oběhového čerpadla a výstup na D/A převodník. Na výstup D/A převodníku je připojeno řízení TČ v rozsahu 0-10 V.



Obr. 2.3 Blokové schéma zapojení MCU

2.4 Srovnání dostupných řídicích jednotek na trhu

Na dnešním trhu je k dispozici mnoho různých řídicích jednotek od mnohých výrobců s různorodými funkcemi. Nejlevnější variantou bývá programovatelný univerzální PID regulátor, jehož cena se pohybuje řádově kolem 10 000Kč [7]. Výkonnějšími variantami jsou specializované řídicí systémy pro regulaci nejen teploty v místnosti, ale například i vody v bazénu apod. Mnohé obsahují připojení k internetu přes ethernet nebo wifi a řízení teploty je tedy možné i mimo domov. Dále obsahují řízení podle denní doby, různé grafické displeje atd. Jejich cena se již pohybuje řádově v desítkách tisíc korun blížící se až k 50 000Kč [8]. Cílem této práce je navrhnout a sestavit vhodnou řídicí jednotku, která bude splňovat základní požadavky regulace za nižší cenu než nabízené systémy.

2.5 Návrh PSD regulace teploty vody v zásobníku topné vody

Regulace teploty TV v zásobníku je přímo závislá na výkonu tepelného čerpadla. Ten se ovládá pomocí analogového vstupu 0-10 V, který bude připojen na výstup A/D převodníku mikrokontroléru (dále jen MCU), který bude celý proces PSD regulace řídit. V případě potřeby je nutné sepnout topnou spirálu přímo v zásobníku, která bude řízena dvoustavově také pomocí MCU přes silový obvod. Při nutnosti zapnutí přitopu již přestává být TČ ekonomické a vyplatí se topit tuhým palivem, což je indikováno na displeji. MCU získává informace o venkovní teplotě t_{OUT} a teplotě TV t_w a na základě těchto hodnot provádí regulaci.

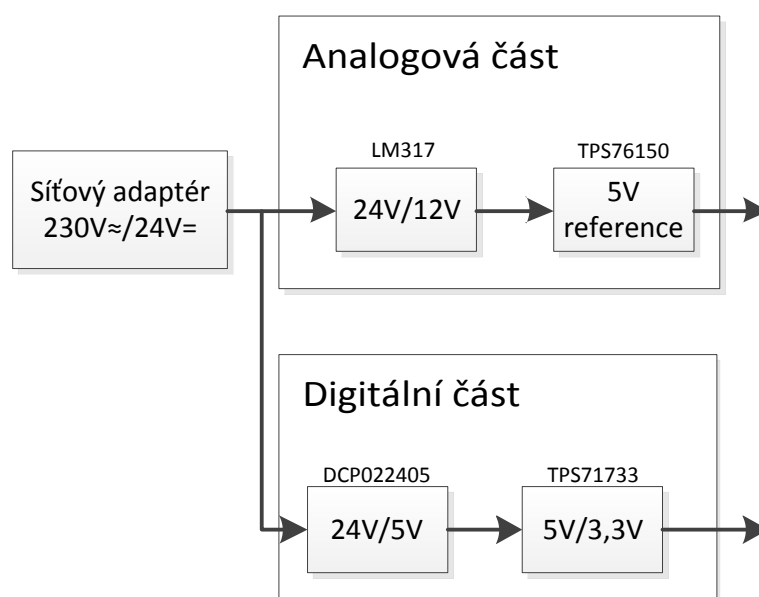
2.6 Návrh dvoustavové regulace domovní teploty

Hlavním úkolem řídicí jednotky je udržovat požadovanou teplotu v budově. Regulace je prováděna pomocí dvoustavové regulace oběhového čerpadla s hysterezí, která je také řízena MCU. Teplota a hystereze je závislá na požadavcích uživatele a denní době, kdy v nočních hodinách postačí poněkud nižší teplota v místnostech a v ranních hodinách opět dotopí na požadovanou úroveň. Všechny parametry jsou nastavitelné prostřednictvím uživatelského rozhraní. MCU tedy získává informace od obvodu reálného času (real time clock - RTC) PCF8563, čidla vnitřní teploty a uživatelského rozhraní a na základě těchto informací řídí oběhové čerpadlo.

3 NÁVRH HARDWARU

3.1 Napájecí zdroj

Tato aplikace neobsahuje žádné výkonové součástky, vykazuje tedy nízký celkový proudový odběr řádově desítky miliampér. Z toho důvodu byl zvolen síťový adaptér se spínaným zdrojem. Napětí 24V ze síťového adaptéru je přiváděno přes tavnou pojistku (500mA) na desku plošného spoje, kde se zdroj dělí na dvě části – analogovou a digitální. V analogové části jsou požadována nesymetrická napětí 12V pro napájení operačního zesilovače a 5V reference pro D/A převodník. Pro transformaci z 24V na 12V je použit třísvorkový stabilizátor LM317 a pro 5V obvod TPS76150. Digitální část požaduje napětí 5V a 3,3V. Pro získání 5V z 24V je zapojen obvod DCP022405, který napájí mikrokontrolér, displej, tlačítka, ISP a spínání relé. 3,3V dodává obvod TPS71733 pro napájení obvodu reálného času a teplotních čidel.



Obr 3.1 Blokové schéma napájecího zdroje

3.1.1 Použité součástky

Použité integrované stabilizátory a DC/DC měniče jsou vyrobeny firmou Texas Instruments

Třísवorkový stabilizátor LM317

- Nastavitelné výstupní napětí 1,2V – 32V
- Maximální výstupní proud 100mA
- Maximální vstupní napětí 35V
- Pouzdro SOIC8

Lineární regulátor TPS76150

- Pevné výstupní napětí 5V
- Maximální výstupní proud 100mA
- Vstupní napětí 5,38V – 16V
- Pouzdro 5-pinové SOT-23

DC/DC měnič DCP022405

- Pevné výstupní napětí 5V
- Maximální výstupní proud 400mA
- Vstupní napětí 21,6V – 26,4V
- Galvanické oddělení vstupu od výstupu
- Pouzdro 12-pinové SO-28

Lineární PSRR regulátor TPS71733

- Pevné výstupní napětí 3,3V
- Maximální výstupní proud 325mA
- Vstupní napětí 2,5V – 6,5V
- Pouzdro SC70-5

Tabulky převzaty z datasheetů výrobce [9]

3.2 Logická část

Základem celé jednotky je mikrokontrolér ATmega16, jehož vlastnosti jsou popsány výše. Bylo nutno zprovoznit komunikaci se čtyřmi teplotními čidly, obvodem reálného času, D/A převodníkem, displejem a klávesnicí. Vzhledem k velké setrvačnosti regulované soustavy není nutná vysoká četnost regulačních zásahů, proto byla u většiny komponentů zvolena sériová komunikace pomocí I²C sběrnice.

3.2.1 Obvod reálného času (RTC)

Pro počítání času byl zvolen obvod DS3231M vyrobený firmou Maxim. Jedná se o obvod reálného času s interním oscilátorem, který počítá sekundy, minuty, hodiny, dny v týdnu, datum a rok, kdy respektuje i přestupný rok. Je možno nastavit dva alarmy, které vyvolají přerušení v případě shody s běžícím časem. Obvod obsahuje také 32 kHz výstup a výstup se signálem o frekvenci 1Hz, který lze nastavit jako příznak alarmu. DS3231M také obsahuje teplotní snímač pro korekci přesnosti času. Obvod má externě připojené napájení pomocí 3.3V lithiové baterie pro případ výpadku napájecího napětí. Komunikace s mikrokontrolérem probíhá pomocí I²C sběrnice. Adresa je pevně dána, je tedy možno použít pouze jeden tento obvod v dané aplikaci.

Tabulka 3.1: Parametry obvodu reálného času DS3231M [10]

Napájecí napětí	2,3V – 5,5V
Nízký proudový odběr	< 500 μ A
Pracovní teplota	-40°C až + 85°C
Pouzdro	SO16
Rychlá I ² C kompatibilní sběrnice	až 400 kHz
Adresa obvodu	1101000

3.2.2 Teplotní čidla

Pro měření teploty byly použity obvody DS7505 od firmy Maxim. Teplotní čidlo může fungovat v režimu měření teploty nebo jako termostat. V této aplikaci pracuje v režimu měření teploty. Obvod má nastavitelnou přesnost měření a to 9-12 bitů, což odpovídá rozlišitelnosti teploty 0,5°C – 0,0625°C. Rychlost převodu je závislá na přesnosti, čím vyšší přesnost, tím delší doba převodu (25ms – 200ms). Pro měření teploty není nutno použít žádné externí součástky. Komunikace s mikrokontrolérem probíhá pomocí I²C sběrnice. Spojení je tedy čtyřvodičové – dva datové a dva napájecí vodiče. Adresa obsahuje tři nastavitelné bity, lze tedy použít v jedné aplikaci až 8 takovýchto čidel. Z důvodu velké vzdálenosti čidel od napájecího zdroje je jejich napájení blokováno kondenzátory 100nF přímo u pouzder.

Tabulka 3.2: Parametry teplotního čidla DS7505 [10]

Napájecí napětí	1,7V – 3,7V
Proudový odběr	< 750 μ A
Pracovní teplota	-55°C až +125°C
Přesnost	$\pm 0.5^\circ\text{C}$
Pouzdro	SO8
Rychlá I ² C kompatibilní sběrnice	až 400 kHz
Adresa obvodu	1001A ₂ A ₁ A ₀

3.2.3 D/A převodník

Pro převod digitální informace na analogovou byl použit 10-ti bitový převodník MAX5811 firmy Maxim. Jedná se o desetibitový D/A převodník. Převádí hodnotu vůči referenční hodnotě, v tomto případě 5V. V režimu nízké spotřeby má tři softwarově nastavitelné výstupní impedance - 100k Ω , 1 k Ω a vysoká impedance. Pro řízení tepelného čerpadla je nutný výstup 0-10V, proto je na výstup převodníku zapojen operační zesilovač LM358 zapojený jako neinvertující zesilovač se zesílením rovným dvěma. Obvod rovněž komunikuje s mikrokontrolérem přes I²C sběrnici. Adresa má jeden nastavitelný bit, je tedy možno použít dva převodníky stejného typu v jedné aplikaci.

Tabulka 3.3: Parametry D/A převodníku MAX5811 [10]

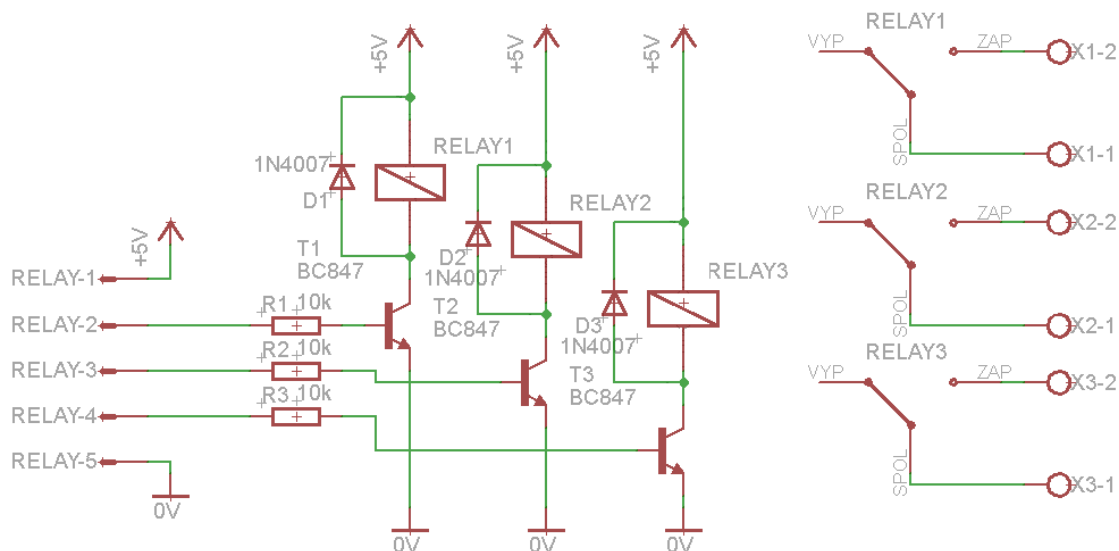
Napájecí napětí	2,7V – 5,5V
Proudový odběr	100 μ A při V _{DD} = 3.6V 130 μ A při V _{DD} = 5.5V
Pracovní teplota	-40°C až +85°C
Rozlišení	10 bitů
Pouzdro	6 SOT 23-6
Rychlá I ² C kompatibilní sběrnice	až 400 kHz
Adresa obvodu	011010A ₀

3.2.4 Displej

Jako zobrazovací prvek byl zvolen monochromatický, podsvícený displej se čtyřmi řádky po šestnácti znacích MC1604B-SYL od firmy EVERBOUQUET/WAYTON. Displej komunikuje s mikrokontrolérem pomocí čtyřvodičového spojení, kdy spodní čtyři datové bity displeje jsou připojeny na zem a horní čtyři datové bity jsou použity ke komunikaci. K displeji je externě připojen odporový trimr 10kΩ pro nastavování kontrastu. Podsvícení je řízeno softwarově pomocí příslušného tlačítka přes mikrokontrolér.

3.2.5 Spínač silové části

Kromě řízení tepelného čerpadla analogovým nízkovýkonovým signálem je nutno spínat i dvoustavová výkonová zařízení - topné spirály v zásobníku teplé vody a oběhové čerpadlo vody do radiátorů. Řízení provádí mikrokontrolér, který spíná přes tranzistory BC 847 tři relátka. Spínací napětí relé je 5V, pro ochranu tranzistorů před proudovými špičkami při vypnutí relé slouží diody 1N4007. Schéma zapojení je na obrázku 3.1.



Obr. 3.1 Schéma zapojení spínače relé

3.3 Návrh desky plošného spoje

Jednotlivé desky plošného spoje (dále jen DPS) jsou navrženy v programu Eagle verze 5.11.0 light, která je volně ke stažení na stránkách výrobce. Zařízení se skládá celkem ze čtyř desek plošných spojů. Základní DPS je navržena jako oboustranná s neprokořenými průchody, na což je brán ohled a veškeré VIA body jsou mimo součástky a spojeny drátovou propojkou. Země jsou rozděleny na analogovou a digitální a jsou spojeny nulovým rezistorem v jednom bodě poblíž D/A převodníku. Vzhledem k nízkým příkonům všech součástek není potřeba brát větší ohled na chlazení a šířka měděných cest postačí 0,4mm. Rozlitá měď (polygon) je spojena se zemí a to zvláště s analogovou a digitální. Na hlavní DPS je připojen mikrokontrolér s externím oscilátorem 16MHz, a většina periférií. Výstupy desky jsou tvořeny konektory. Jedná se o výstupy na displej, tlačítka, teplotní čidla, spínání relé a analogový výstup na tepelné čerpadlo. Z důvodu co nejmenšího počtu připojených kabelů k hlavní jednotce je připojen jeden vstup pro teplotní čidla, který se rozdělí na další DPS na čtyři výstupy pro čidla. Tato DPS je jednostranná a slouží pouze jako rozbočka. Další externí DPS, rovněž jednostranná, tvoří tranzistorový spínač třech relé. Poslední DPS je součástí displeje a je vytvořena výrobcem.

4 NÁVRH SOFTWARE

Program pro mikrokontrolér je napsán v jazyce C ve vývojovém prostředí AVR Studio 4. Jako rozhraní mezi PC a mikrokontrolérem je použit programátor AVRISP mkII In-System Programmer od firmy Atmel. Knihovny funkcí pro řízení I²C sběrnice byly převzaty od Petera Flueryho [11]. Pro komunikaci s displejem byla převzata knihovna vytvořená autory: Peter Fleury, doc. Ing. Tomáš Frýza, Ph.D. a Thomas Breining [12].

4.1 Algoritmus

Základní algoritmus je následující. Na začátku je definice knihoven a potřebných proměnných, nastavení přerušení a spuštění 16ti-bitového časovače, inicializace displeje a I²C sběrnice a nastavení periferních obvodů. Následuje nekonečná smyčka, ve které se čtou informace z časovacího obvodu a teplotních čidel. Dále v této smyčce je skupina podmínek představující menu, jeho ovládání pomocí tlačítek a zobrazování na displej. Jelikož je velká setrvačnost celého systému, není potřeba, aby byly regulační zásahy příliš časté. Na konci algoritmu je tedy podmínka, která testuje čítací registr, jestli dosáhl určité hodnoty. V každém cyklu se registr inkrementuje a je tak možno dosáhnout prakticky jakékoliv frekvence vzorkování. Pokud registr nabude dané hodnoty, provede se výpočet regulačních zásahů a registr se opět vynuluje.

4.1.1 Algoritmus regulace

Po získání informací o měřených teplotách následuje podmínka pro spínání oběhového čerpadla, kdy se porovnává nastavená teplota T_{SET} a vnitřní pokojová teplota T_{IN} . Podmínka obsahuje nastavitelnou hysterezi. Parametry následné PI regulace jsou různé pro sepnuté a vypnuté oběhové čerpadlo, proto je v těle podmínky rovněž nastaveno zesílení a integrační konstanta. Následuje rozhodnutí, zda je provoz TČ ekonomický v závislosti na venkovní teplotě T_{OUT} . Rozhodovací úroveň je nastavena na -18°C , s 1°C hysterezí. V případě nižší teploty se tepelné čerpadlo vypne a sepnou se topné spirály v zásobníku topné vody a tento stav je indikován na displeji rozsvícením hvězdičky v pravém horním rohu. Pokud je venkovní teplota vhodná pro provoz TČ, proběhne výpočet požadované teploty vody v zásobníku T_w , jak ukazuje obrázek 2.1. Následuje samotná PI regulace s nastavenými parametry. Regulátor je opatřen omezením integrační složky v rozsahu 0 – 100%, aby nedocházelo k rozkmitání soustavy – tzv. anti-windup. Vypočtený akční zásah se opět omezí na interval 0 – 100% (což odpovídá napětí 0 – 10V), přepočítá se do tvaru vhodného pro přenos a vyšle na výstup na D/A převodník.

4.2 Ovládání jednotky

Jako zobrazovací prvek je zvolen čtyřřádkový displej. Ovládací část tvoří šest tlačítek – šipky „nahoru“, „dolů“, „doleva“, „doprava“, potvrzovací klávesa „Enter“, návratová klávesa „Esc“ a tlačítko pro rozsvícení/zhasnutí displeje. Menu tvoří tři obrazovky, mezi nimiž se přepíná tlačítka „doleva“ a „doprava“. Hlavní menu zobrazuje venkovní a vnitřní teplotu, datum a čas. Druhé menu zobrazuje veškeré teploty – vnitřní, venkovní a teplotu vody v zásobníku a okamžitý výkon TČ. Třetí menu slouží k nastavení data a času. Pro potvrzení nastavení času slouží tlačítko „Enter“. Pomocí šipek „doleva“ „doprava“ se přechází mezi sekundami, minutami, hodinami atd. jejich hodnota se nastavuje tlačítka „nahoru“ a „dolů“. Potvrzení nastavení času se provede stiskem klávesy „vpravo“ při nastavování roku.

4.3 Nastavení parametrů regulátoru

Získat přenos soustavy vytápění daného domu je poměrně složité. Navíc je přenosová charakteristika silně závislá na venkovní teplotě. V řídicí jednotce je použit diskrétní regulátor s možností poměrně jednoduchého upravení parametrů, proto pro získání parametrů PI regulátoru byla použita metoda intuitivního nastavení a doladění při následném měření chování regulátoru a soustavy. Pro vnitřní regulaci (dvoustavovou) je jediným parametrem hystereze. Ta byla na základě empirických znalostí nastavena na hodnotu kolem čtyř desetin stupně (teplota se tedy pohybuje v rozsahu $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ okolo nastavené hodnoty). Parametr je opět možné jednoduchým způsobem upravit. Obdobně lze úpravou výpočtu upravit ekvitermní křivku, která je zobrazena na obr. 2.1.

5 ZÁVĚR

V první, teoretické části, byly popsány fyzikální principy tepelného čerpadla, druhy a možnosti, výhody a nevýhody použití čerpadel. Byly teoreticky rozebrány možnosti regulace a nastavení PID, PSD a dvoustavového regulátoru. Z důvodu velké setrvačnosti systému byl zvolen diskrétní PI regulátor. Následuje konkrétní blokové schéma zapojení topné soustavy v domě a naznačení základních závislostí. V blokovém schématu zapojení MCU je zobrazeno zapojení periférií k mikrokontroléru. V tabulkách jsou uvedeny konkrétní parametry tepelného čerpadla a jeho součástí. Dále je uvedeno srovnání dostupných komerčních regulátorů. Při návrhu a ožívování zapojení se objevila celá řada problémů, které se podařilo vyřešit. Největším problémem bylo zprovoznění komunikace s teplotními čidly, protože jsou fyzicky poměrně hodně vzdálené od základní desky. Docházelo k zacyklení při špatné interpretaci posílaných dat. Problém byl hardwarově vyřešen blokováním napájecího napětí u čidel a proložením datových vodičů zemnicemi. Softwarově byla snížena rychlost hodinového signálu I²C sběrnice a byla přidána časová smyčka, kdy při neodpovídání „slave“ obvodu do určité doby dojde k přerušení komunikace a pokračování běhu programu dále. Základní PI regulaci se podařilo prakticky odzkoušet a vyladit její parametry, naměřené hodnoty jsou graficky znázorněny v příloze. Simulací různých snímaných teplot byla ověřena funkce oběhového čerpadla, indikace neekonomičnosti s následným vypnutím tepelného čerpadla a sepnutí topných spirál. Pro vyladění regulace vnitřní teploty nebyly ideální venkovní podmínky, avšak algoritmus je plně funkční. Ukázka zdrojového kódu je uvedena v příloze, celý zdrojový kód je přiložen v elektronické podobě na CD. Důležitým kritériem byla celková pořizovací cena. Díky použití „sample“ vzorků integrovaných obvodů od firmy Maxim a Texas Instruments (jejichž celková cena je cca 400Kč) a výroby desky plošného spoje ve školní laboratoři se cena prototypu pohybuje kolem 1350 Kč. V budoucnu je v plánu odladit regulaci vnitřní domovní teploty a přidat možnost nastavování teploty v závislosti na denní době a dni v týdnu. Další plánovanou úpravou je instalace elektronických ventilů na radiátory a řízení teploty v každé místnosti zvlášť.

LITERATURA

- [1] *Abeceda tepelných čerpadel* [online]. 2005 [citováno 2011-12-09]. Abeceda tepelných čerpadel. Dostupné z: <<http://www.abeceda-cerpadel.cz>>.
- [2] ŽERAVÍK, Antonín. *Stavíme tepelné čerpadlo*. První. Přerov : Vydáno vlastním nákladem, 2003. 312 s. ISBN 80-239-0275-X.
- [3] PAZOUR, Z. *Víceparametrový regulátor oběhového čerpadla*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 80s., 7 příl., Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.
- [4] *Vybavení pro domácnosti, průmysl a laboratoře*. Opava, Ostravská 2B: MVB Opava s.r.o., 2011, [citováno 2011-12-24]. Dostupné z: <<http://www.mvb.cz/>>
- [5] Atmel Corporation. ATmega16A datasheet [online]. Vydáno 2007, [citováno 2011-12-26]. Dostupné z: <http://www.urel.feec.vutbr.cz/~fryza/downloads/atmel_atmega16.pdf>
- [6] Fujitsu service manual AOYA45LATL/ARYA 45LATN datasheet. Vydáno 2007
- [7] *E-therm a.s.* [online]. [citováno 2011-12-29]. Dostupné z: <<http://www.ethermshop.cz>>
- [8] *AC Heating* [online]. [citováno 2011-12-29]. Dostupné z: <<http://www.ac-heating.cz>>
- [9] *Texas instruments* [online]. [citováno 2012-05-09]. Dostupné z: <<http://www.ti.com/>>
- [10] *Maxim Integrated products* [online]. [citováno 2012-05-09]. Dostupné z: <<http://www.maxim-ic.com/>>
- [11] *Peter Fleury* [online]. [citováno 2011-12-29]. Dostupné z: <<http://jump.to/fleury>>
- [12] *Tomas Fryza home page* [online]. [citováno 2011-12-29]. Dostupné z: <<http://www.urel.feec.vutbr.cz/~fryza/>>

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

TČ – tepelné čerpadlo

t – teplota, čas

T – perioda

f – frekvence

Q – vnitřní energie tělesa (teplo)

TUV – Teplá užitková voda

y – výstupní veličina

w – řídicí veličina

e – regulační odchylka

u – akční veličina

pp – pásmo proporcionality

PID – proporcionálně integračně derivační regulátor

PSD – proporcionálně sumačně diferenční regulátor

A/D – analogově digitální převodník

D/A – digitálně analogový převodník

MCU – mikrokontrolér (microcontroller unit)

SPI – rozhraní pro sériové programování mikrokontroléru

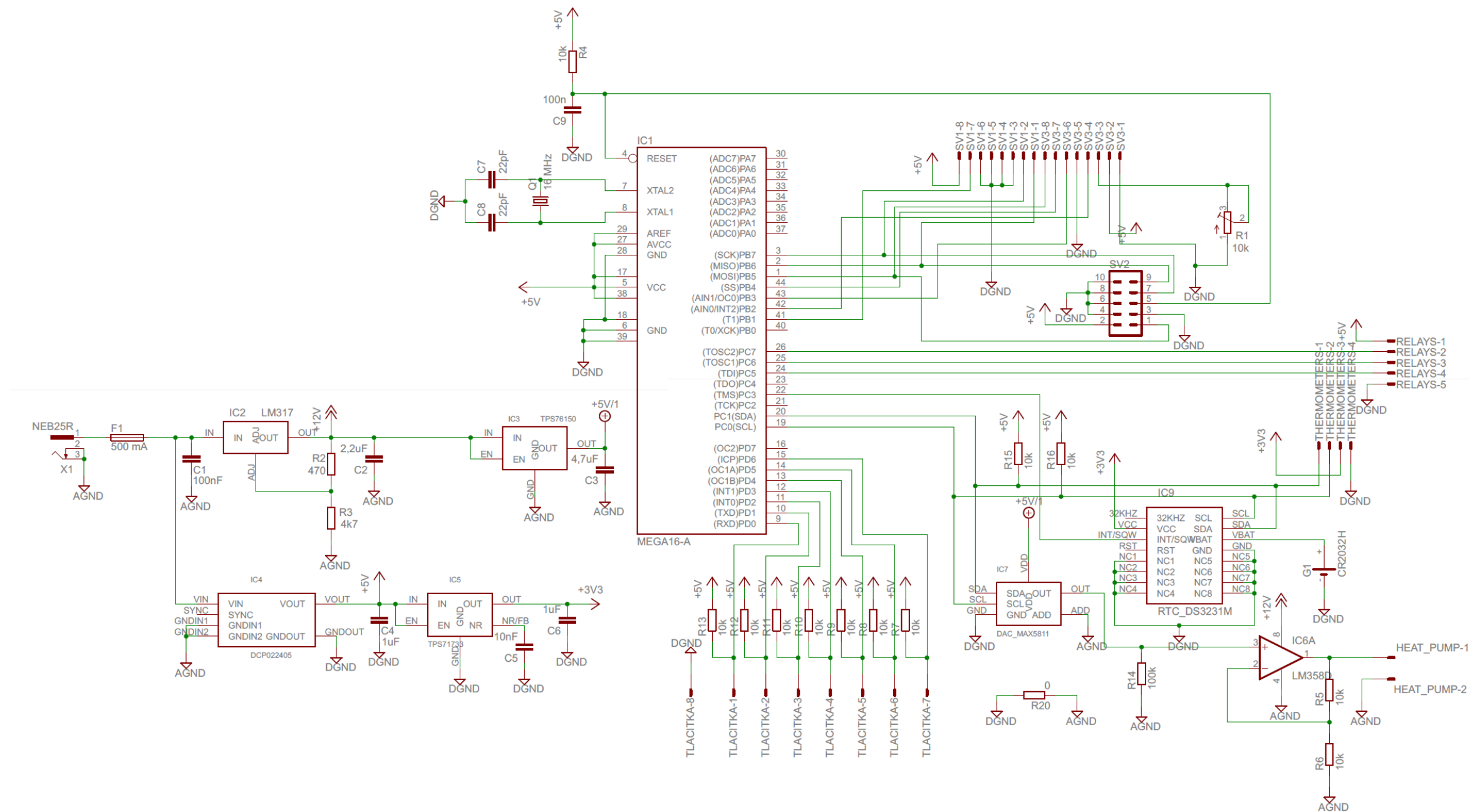
ISP – programování v systému (in-system programming)

RTC – obvod reálného času (real time clock)

SEZNAM PŘÍLOH

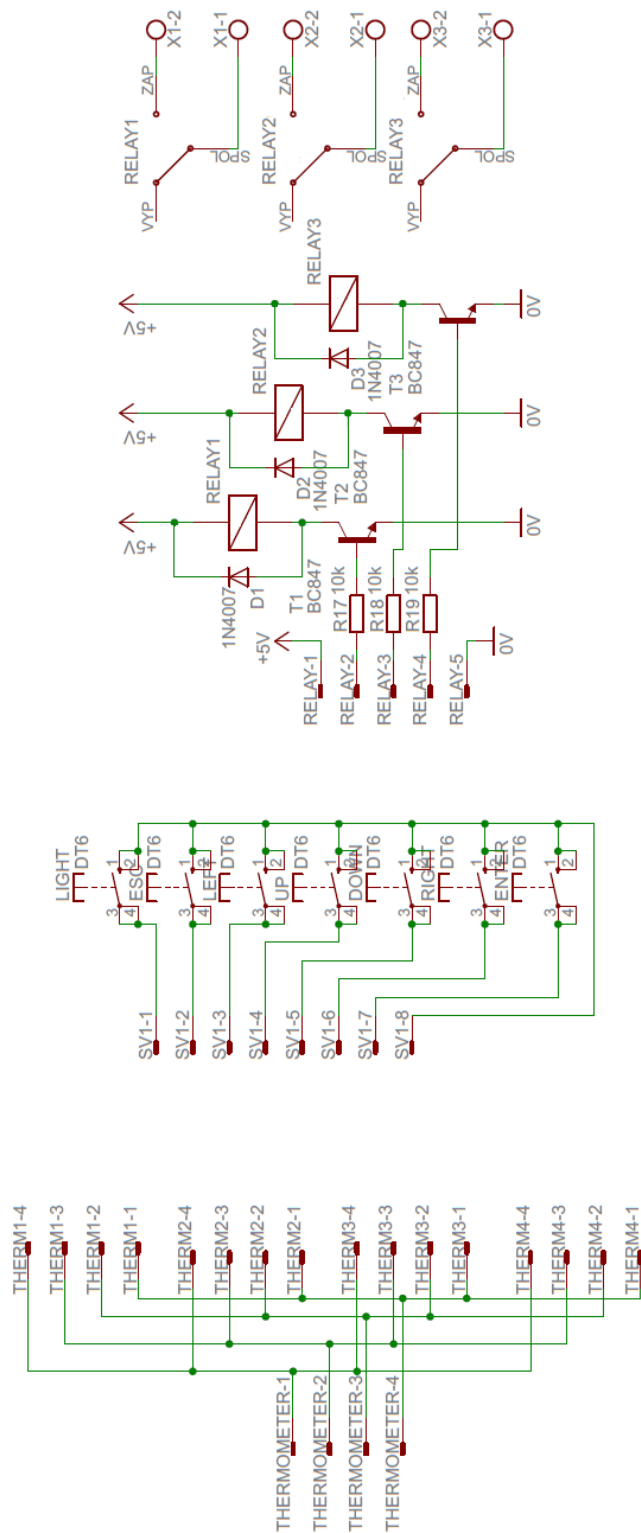
A	Schémata zapojení	I
B	Schéma zapojení	II
C	Desky plošného spoje	III
D	Osazovací výkresy	V
E	Seznam součástek	VI
F	Naměřené časové průběhy regulace topné vody	VIII
G	Fotografie	IX
H	Ukázka zdrojového kódu	X

A SCHÉMATA ZAPOJENÍ



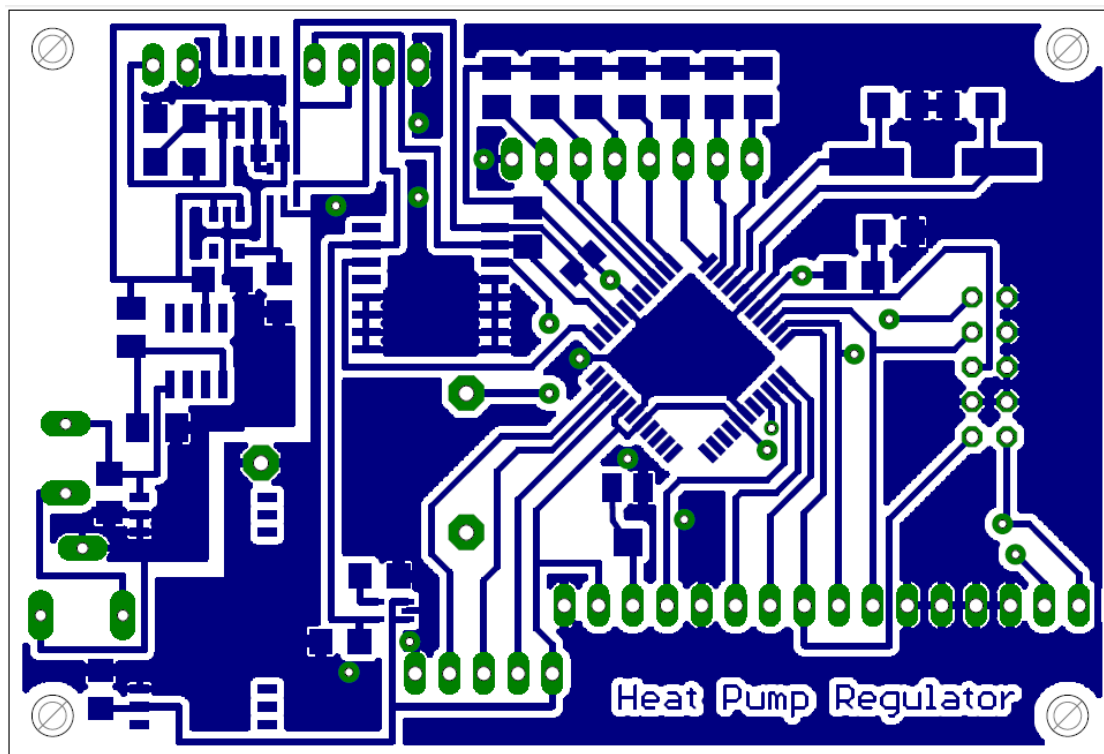
Obr. 5.1 Schéma zapojení řídicí desky

B SCHÉMA ZAPOJENÍ

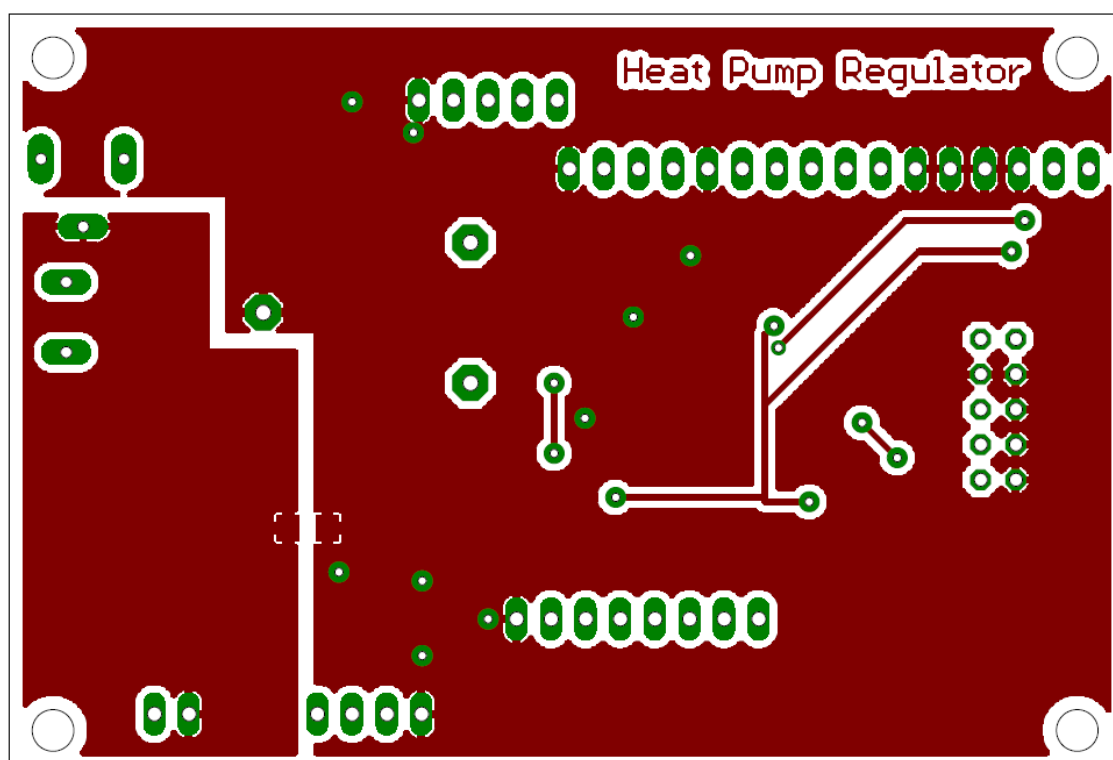


Obr. 5.2 Schéma zapojení periférních obvodů

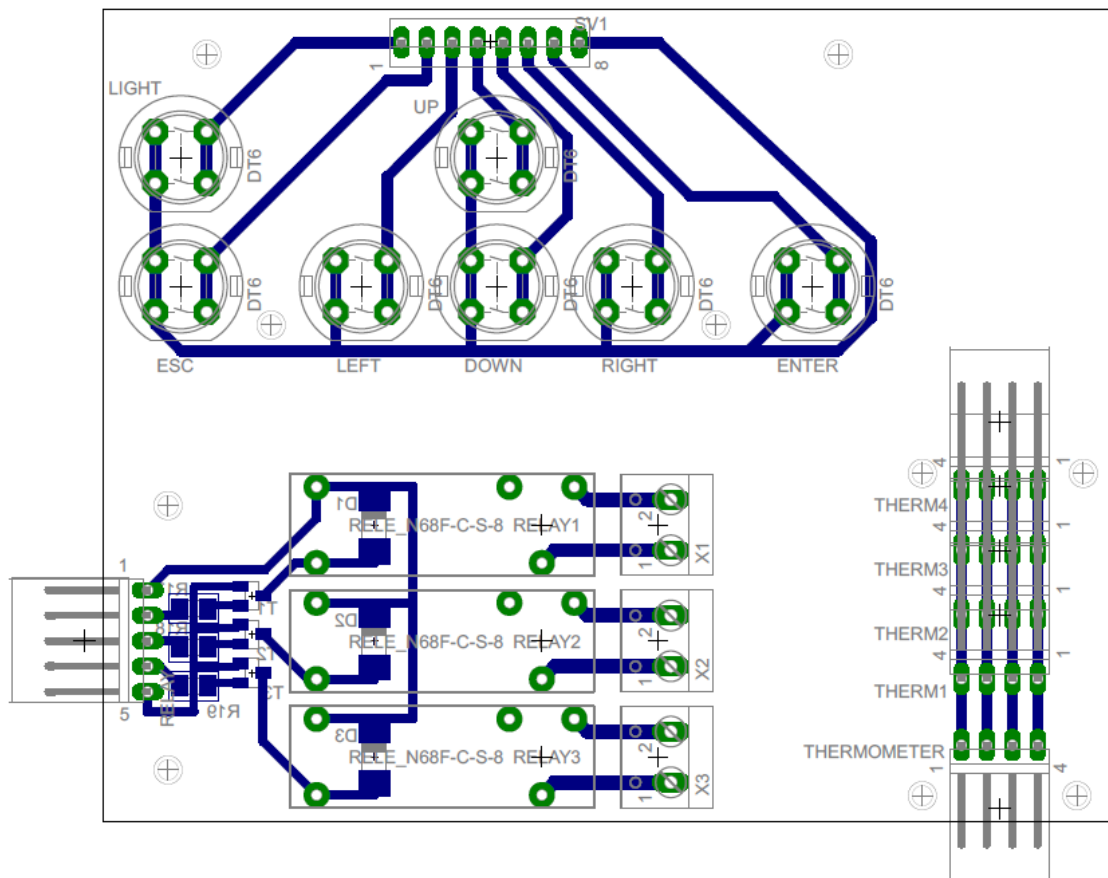
C DESKY PLOŠNÉHO SPOJE



Obr. 5.3 Deska plošného spoje ze strany spojů

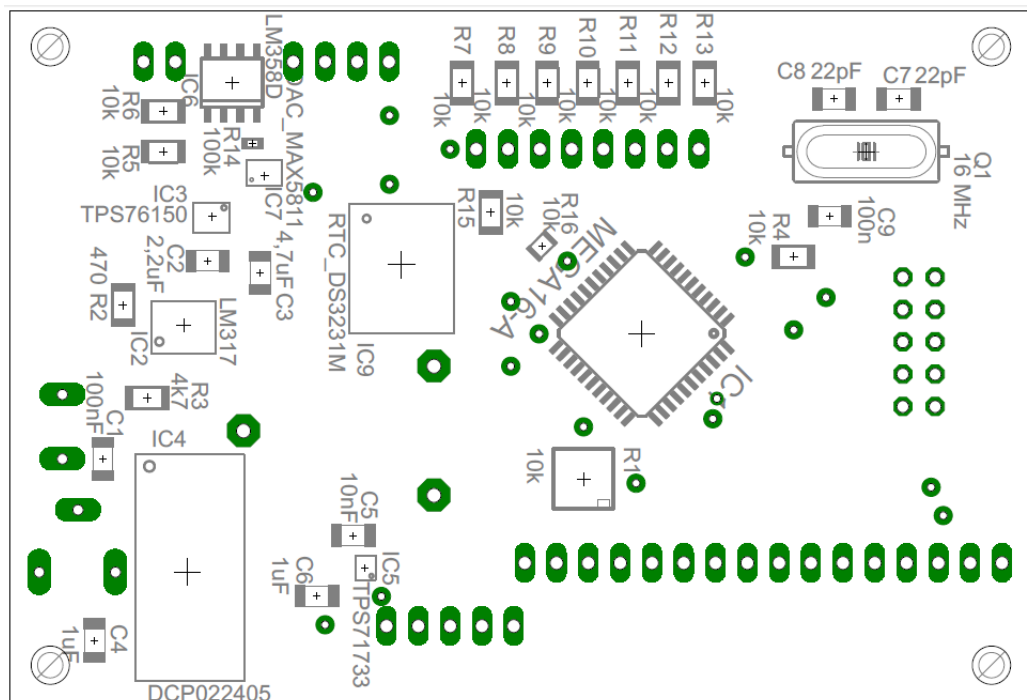


Obr. 5.4 Deska plošného spoje ze strany součástek

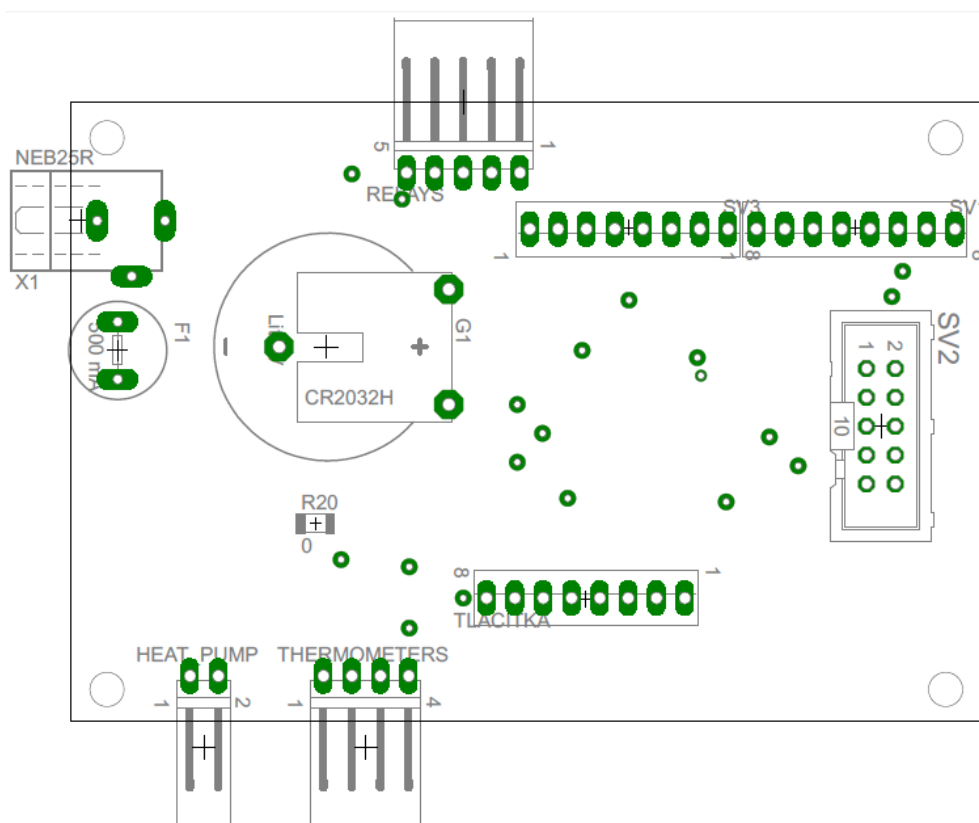


Obr. 5.5 Deska plošného spoje periferních obvodů

D OSAZOVACÍ VÝKRESY



Obr. 5.6 Osazovací výkres ze strany spojů



Obr. 5.7 Osazovací výkres ze strany součástek

E SEZNAM SOUČÁSTEK

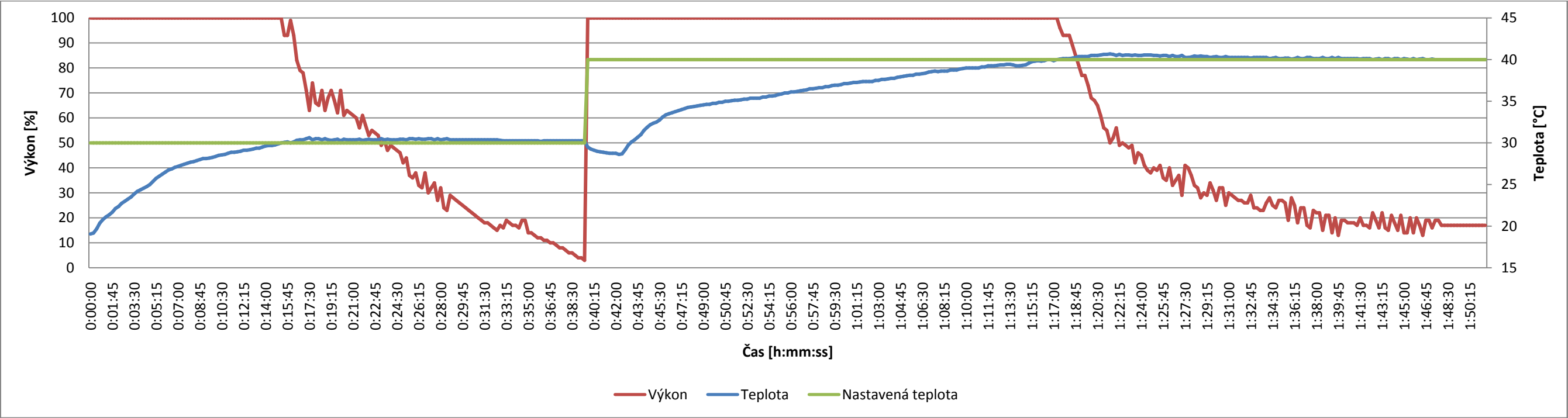
Tabulka 5.1 Seznam součástek

Součástka	Označení	Hodnota	Pouzdro	Výrobce	Počet kusů	Jednotková cena v Kč
Mikrokontrolér	IC1	ATmega16-16AU	TQFP44	Atmel	1	108
Stabilizátor	IC2	LM317I	SOIC8	Texas Instruments	1	2,8
Lineární regulátor	IC3	TPS76150	SOT-23	Texas Instruments	1	7,4
DC/DC měnič	IC4	DCP022405	SO-28	Texas Instruments	1	115,6
Lineární regulátor	IC5	TPS71733	SC70-5	Texas Instruments	1	7,2
Operační zesilovač	IC6	LM358D	SOIC8	Texas Instruments	1	4,4
D/A převodník	IC7	MAX5811	SOT 23-6	Maxim	1	35,2
Obvod reálného času	IC8	DS3231M	SO16	Maxim	1	54,2
Teplotní čidlo	IC9	DS7505	SO8	Maxim	4	28,2
Displej	D	MC1604B-SYL	16CH x 4L	Everbouquet	1	359
Napájecí adaptér	-	24V/500mA	-	Sunny Computer	1	154
Pojistka	F1	500mA	-	Schurter	1	10
Li-baterie	G1	3V	CR2032H	Chung pak	1	8,8
Krystal	Q1	16MHz	HC49UP	HC49USSMD	1	6,5
Tranzistor	T1, T2, T3	BC847	SOT23	Semtech	3	1,1
Dioda	D1, D2, D3	1N4007	DO213AA	Semtech	3	1
Relé	Relay1 - Relay3	DC5V	-	Forward	3	29,6
Konektor do DPS	Heat_pump	PSH02-02	-	Hsuan	1	1
Konektor do DPS	Thermometers	PSH02-04	-	Hsuan	6	2,2
Konektor do DPS	Tlacítko, SV1, SV3	PSH02-08	-	Hsuan	6	4,3
Konektor do DPS	Relays	PSH02-05	-	Hsuan	2	2,8
Konektor	-	PFH02-02	-	Hsuan	1	0,5
Konektor	-	PFH02-04	-	Hsuan	6	1,6
Konektor	-	PFH02-08	-	Hsuan	6	2,2
Konektor	-	PFH02-05	-	Hsuan	2	1,6
ISP konektor	SV2	MLW10G	-	-	1	5,5
Tlačítko	Left, Right, Up, Down,ESC, Enter, Light	P-DT6GR	-	Highly	7	13,1
Napájecí konektor	X1	-	2,1mm	Wealthmetal	1	4,6
Rezistor	R1	10kΩ	TS53YL	Vishay	1	27,7
Rezistor	R2	470Ω	1206	Yaego	1	2
Rezistor	R3	4,7kΩ	1206	Yaego	1	2
Rezistor	R4 - R13, R15, R17 - R19	10kΩ	1206	Yaego	14	2
Rezistor	R14	100kΩ	0603	Yaego	1	2

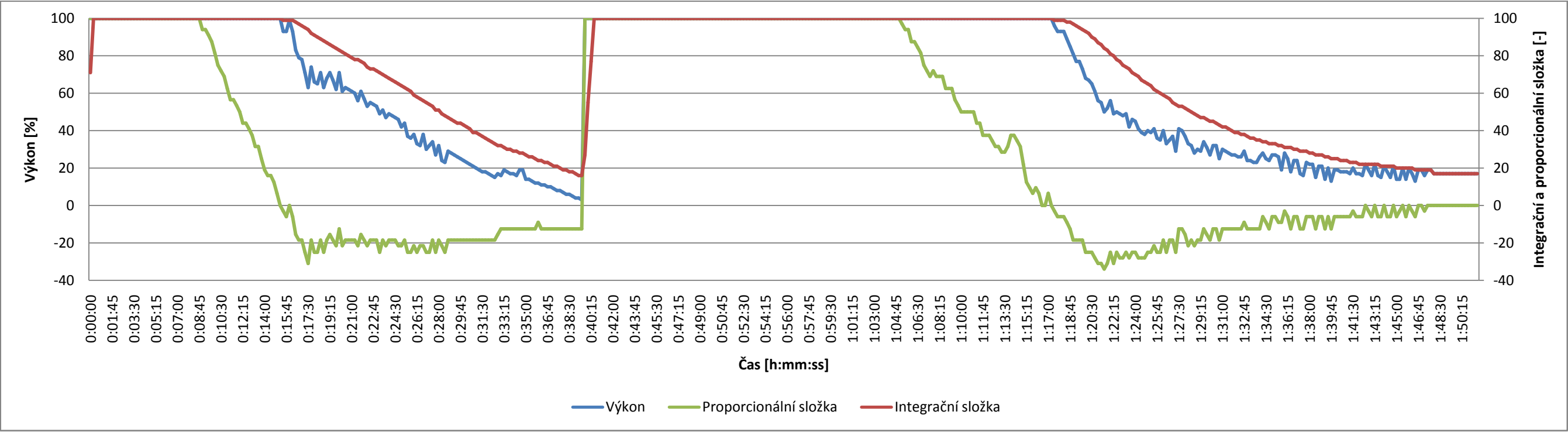
Součástka	Označení	Hodnota	Pouzdro	Výrobce	Počet kusů	Jednotková cena v Kč
Rezistor	R16	10kΩ	0805	Yaego	1	2
Rezistor	R20	0Ω	1206	Yaego	1	2
Kondenzátor	C1, C9	100nF	1206	Hitano	2	2
Kondenzátor	C2	2,2μF	1206	Hitano	1	2
Kondenzátor	C3	4,7μF	1206	Hitano	1	2
Kondenzátor	C4, C6	1μF	1206	Hitano	2	2
Kondenzátor	C5, C10, C11, C12, C13	10nF	1206	Hitano	5	2
Kondenzátor	C7, C8	22pF	1206	Hitano	1	2

Celková cena: 1345 Kč

F NAMĚŘENÉ ČASOVÉ PRŮBĚHY REGULACE TOPNÉ VODY



Obr. 5.8 Průběh regulace teploty a výkonu v čase



Obr. 5.9 Časový průběh Integrační a proporční složky a výkonu při regulaci

G FOTOGRAFIE



Obr. 5.10 Fotografie experimentálního zapojení

H UKÁZKA ZDROJOVÉHO KÓDU

```
// Variables for Regulation
float hyst = 0.5;
float e = 0;
float integ = 2;
float u = 0;
char k = 5;
char Ti = 10;
float Tset,Tin,Tvody,Tw,Tout = 0;

float us;
char integchar,uchar;

unsigned char temp = 0;

//----- REGULATION ALGORITHM -----
/*
Tout ...   venkovni teplota
Tvody ...   teplota v zásobníku
Tw ...     požadovaná teplota vody závislá na Tout
e ...      regulační odchylka
integ ...   integrační konstanta
u ...      výstupní hodnota
k ...      zesílení
Tvz ...    vzorkovací perioda
Ti ...     integrační časová konstanta
*/

if(teplota1==1)
    {Tvody = (-1)*(vMSB + vLSB/100);}
else {Tvody = vMSB + vLSB/100;}

if(teplota2==1)
    {Tout = (-1)*(vMSB1 + vLSB1/100);}
else {Tout = vMSB1 + vLSB1/100;}

if(teplota3==1)
    {Tin = (-1)*(vMSB2 + vLSB2/100);}
else {Tin = vMSB2 + vLSB2/100;}

if(Tin<(Tset-hyst)) // Switch pump and set PI parameters
{PORTC |= (1<<PC5); // Pump on
    temp = 1;
    k = 5;
    Ti = 15;
}

else if(Tin>(Tset+hyst))
{PORTC |= (0<<PC5);
    temp = 0; // Pump off
    k = 5;
    Ti = 15;
}
else
{
    if (temp==1){PORTC |= (1<<PC5);}
}
```

```

if (temp==0){PORTC |= (0<<PC5);}
}

if(Tout>-18)
{
    lcd_gotoxy(15,0);        // Sign switched-off heat elements
    sprintf(buffer, " ");

    PORTC |= (0<<PC6)|(0<<PC7);    // Switch-off support heating

//Calculation Tw

    Tw = 41-0.4*Tout/5;
    if (Tout<-12)
    {Tw = 46;}
    if (Tout>20)
    {Tw = 33;}

//Calculation of intervention e

    e = Tw - Tvody;
    integ = e/Ti + integ;

    if (integ>10)                // Antiwind-up
    {integ = 10;}

    if (integ<0)                 // Antiwind-up
    {integ = 0;}
    integchar = integ*10;

    u = k*e + integ;

    if (u>10)                    // Limitation u for max 10V
    {u = 10;}

    if (u<0)                     // Limitation u for min 0V
    {u = 0;}

    us = 10*u;
    uchar = us;

//Conversion data for transmission and transmit "u" to DAC

    data = u*1023/5/2;
    data_first = data/64+192;        // First byte
    data_second = data*4;           // Second byte

// Transmitting to DAC
    i2c_start(0b01101000);        // Start cond., 7bit address, R/W
    i2c_write(0b01000000);        // Power up device
    i2c_stop();

    i2c_start(0b01101000);
    i2c_write(data_first);        // Write data to DAC
    i2c_write(data_second);       // Write data to DAC

```

```

i2c_stop();                                // Stop condition

}
else
{
    PORTC |= (1<<PC6)|(1<<PC7);    // Switch-on support heating
    lcd_gotoxy(15,0);
    sprintf(buffer, "*");          // Write "*" on Display
    lcd_puts(buffer);
}

} //end if count

```