

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra mikroelektroniky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2015

Bc. Pavel Bařina

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra mikroelektroniky

Bezkontaktní teploměr se senzorem ZTP-135SR

Non-contact thermometer with the sensor ZTP-135SR

DIPLOMOVÁ PRÁCE

květen 2015

Diplomant: Bc. Pavel Bařina

Vedoucí práce: Ing. Adam Bouřa, Ph.D.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Datum: 7. 5. 2015

.....

podpis diplomanta

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra mikroelektroniky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. B A Ř I N A Pavel**

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika
Obor: Elektronika

Název tématu: **Bezkontaktní teploměr se senzorem ZTP-135SR**

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s problematikou bolometrů a termočláňkových senzorů pro bezkontaktní měření teploty. Prostudujte možnosti návrhu vyhodnocovacích obvodů k těmto senzorům a možnosti polohování senzoru za účelem zpřesnění informace o měřeném objektu.
2. Na základě získaných poznatků zvolte vhodné technické řešení a realizujte modul, který umožní bezkontaktní měření teploty a zobrazení plošného rozložení teploty v měřené oblasti.
3. Sestavte testovací pracoviště, proveďte měření a kriticky zhodnotte dosažené parametry vašeho řešení. Na základě výsledků testování případně navrhněte další možná vylepšení.

Seznam odborné literatury:

- [1] Matoušek, D.: Práce s mikrokontroléry ATMEL AVR AT mega 16, 4. díl, Praha 2006, Nakladatelství BEN - technická literatura, ISBN 80-7300-174-8.
- [2] Mann, B.: C pro mikrokontroléry, 1. Vydání, Praha 2003, Nakladatelství BEN - technická literatura, ISBN 80-7300-077-6.
- [3] Vedral, J., Fischer, J.: Elektronické obvody pro měřicí techniku, Vydavatelství ČVUT, Praha, 2004, ISBN 80-01-02966-2
- [4] GE Measurement & Control: ZTP-135SR Thermometrics Thermopile IR Sensor, Datasheet, 2012, URL: http://www.mouser.com/catalog/specsheets/ZTP_135SR_Datasheet.pdf

Vedoucí: **Ing. Adam Bouřa, Ph.D.**

Platnost zadání: 31. 8. 2016


Prof. Ing. Miroslav Husák, CSc.
vedoucí katedry




prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 9. 2. 2015

Poděkování

Úvodem bych chtěl poděkovat svému vedoucímu práce Ing. Adamu Bouřovi, Ph.D.

Současně bych chtěl poděkovat svým rodičům, že mi umožnili studovat na vysoké škole.

Abstrakt

Úkolem práce je navržení bezkontaktního teploměru se senzorem ZTP-135SR. Teploměr bude výjimečný v tom, že bude schopen pomocí jednoho senzoru nasnímat teplotu plošně. V práci je tedy nejprve popsán teoretický úvod týkající se problematiky bolometrů a termočláňkových senzorů. Následně je podrobně rozebrán návrh jednotlivých částí teploměru (analogová a digitální část). Na základě těchto návrhů je vytvořen funkční prototyp bezkontaktního teploměru s možností plošného snímání teploty. V závěru práce jsou též rozebrány možnosti dalšího vylepšení.

Klíčová slova

Senzor, bolometr, mikrokontrolér, servomotor

Abstract

The task of this work is to design a non-contact thermometer with the sensor ZTP-135SR. The thermometer is unique because it will be able to scan temperature across the board only with one sensor. The work is first described as a theoretical introduction about bolometer and thermocouples. Subsequently, there is a detailed analysis of each part of the thermometer design (analog and digital parts). Based on these proposals, is created a functional prototype of a non-contact thermometer with the sensor ZTP-135SR. At the conclusion of the work, there are also discussed opportunities for further improvements.

Keywords

Sensor, bolometer, microcontroller, servomotor

Seznam zkratek a symbolů

AD	Analog Digital
CMRR	Common Mode Rejection Ratio, činitel potlačení souhlasného signálu
DPS	deska plošných spojů
IR	Infrared, infračervené záření
LCD	Liquid Crystal Display, displej z tekutých krystalů
NTC	Negative Temperature Coefficient, negativní teplotní koeficient
PWM	Pulse Width Modulation, pulse šířková modulace
RX	Receive, přijímač
TX	Transmit, vysílač
USART	Universal Synchronous Asynchronous Receiver and Transmitter, univerzální synchronní asynchronní přijímač a vysílač
USB	Universal Serial Bus, univerzální sériová sběrnice
A	(-) napět'ové zesílení
I	(A) elektrický proud
R	(Ω) elektrický odpor
U	(V) elektrické napětí

Obsah

1.	Úvod.....	1
2.	Teoretický rozbor.....	2
2.1	Popis a princip bolometrů a termočláňkových senzorů	2
3.1.1	Princip bolometru	2
3.1.2	Materiály používané v bolometrech	2
3.1.3	Konstrukce bolometru	3
3.1.4	Princip termočláňkových senzorů	4
3.1.5	Materiály používané v termočláňkových senzorech	5
3.1.6	Emisivita.....	5
3.1.7	Senzor ZTP 135SR	6
2.2	Vyhodnocovací jednotka pro termočláňkový výstup senzoru	9
2.3	Vyhodnocovací jednotka pro termistorový výstup senzoru.....	12
2.4	Vyhodnocovací jednotka pro zobrazení jedné teploty na alfanumerickém displeji	14
2.5	Řídící jednotka pro servomotory.....	15
2.6	Vyhodnocovací jednotka pro zobrazení matice teplot v terminálu na osobním počítači pomocí USART komunikace.....	18
3.	Návrh analogové části.....	21
3.1	Návrh vyhodnocení pro termočláňek.....	21
3.1.1	Návrh přístrojového zesilovače	21
3.1.2	Návrh sčítačky	25
3.1.3	Návrh napěťové reference	26
3.2	Návrh vyhodnocení pro termistor	27
3.3	Návrh symetrického zdroje napětí	29
4.	Návrh digitální části.....	32
4.1	Návrh vyhodnocovací jednotky pro zobrazení jedné teploty.....	32

4.1.1	Vyhodnocovací jednotka pro zobrazení jedné teploty	32
4.1.2	Ověření funkčnosti zobrazení jedné teploty	37
4.1.3	Testování detekce senzoru s vymezovací trubičkou.....	38
4.2	Návrh řídicí jednotky servomotorů	39
4.2.1	Napájecí obvod servomotorů.....	40
4.2.2	Návrh řídicích hodnot pro generování PWM signálu.....	41
4.2.3	Program pro ovládání servomotorů	43
4.3	Návrh vyhodnocovací jednotky pro zobrazení matice teplot o rozměru 10×10. 44	
4.3.1	Funkce pro převod hodnot teplot na váhy teplot	44
4.3.2	Nastavení USART komunikace.....	46
4.3.3	Zobrazení obrazce nasnímaného předmětu pomocí terminálu	46
5.	Sestavení finálního programu a elektronického obvodu celého senzoru.....	48
5.1	Sestavení finálního programu blokově	48
5.2	Popis funkce finálního programu	48
6.	Ověření funkčnosti testováním	50
6.1	Ovládání senzoru.....	50
6.2	Testování senzoru	50
6.2.1	Testování režimu 1 (jednobodové snímání)	50
6.2.2	Testování režimu 2 (plošné snímání).....	52
7.	Návrh možných vylepšení	54
7.1	Jednobodové snímání teploty – režim 1.....	54
7.2	Plošné snímání teploty – režim 2	54
8.	Závěr	55
9.	Literatura.....	56
10.	Seznam obrázků	58
11.	Seznam tabulek	61
12.	Seznam příloh	62

1. Úvod

V dnešní době existuje celá řada bezkontaktních teploměrů. Jedno z největších zastoupení mají tyto teploměry v lékařství. Plošné bezkontaktní teploměry jsou dnes známy zejména jako termokamery, které využívají velké matice bolometrů doplněné přesnou optikou. A právě matice bolometrů je vytvářena z drahých materiálů a tak i termokamery jsou na trhu k dostání za poměrně vysoké částky.

V teoretickém rozboru mé práce bude popsáno základní seznámení s problematikou kolem bezkontaktního měření teploty, zejména pak pomocí bolometrů a termočláňkových senzorů. Poté budou popsány možnosti návrhu vyhodnocovacích obvodů k těmto senzorům a možnosti polohování senzoru pro zpřesnění informace o měřeném objektu. Na základě získaných poznatků z teoretického rozboru, bude následně navrhnout modul, který umožní bezkontaktní měření teploty a zobrazení plošného rozložení teploty v měřené oblasti.

Návrh modulu je rozdělen na analogovou a digitální část. V analogové části budu řešit řídicí jednotku pro zpracování signálu ze senzoru. V digitální části budu řešit polohovací mechanismus pomocí servomotorů a zobrazení nasnímaných dat pomocí USART komunikace. Po nastudování problematiky těchto částí, lze součástí modulu navrhnout a sestavit pro měření a simulace.

Cílem diplomové práce je realizace bezkontaktního teploměru s možností plošného snímání měřeného objektu. Bude tedy nutné navrhnout desku plošných spojů pro řídicí jednotku celého senzoru spolu s polohovací mechanikou pro možnost plošného snímání teploty měřeného objektu. Vznikne tak nový teploměr, který by měl pomocí jednoho senzoru umožnit plošné snímání objektu.

Po navrhnutí desky plošných spojů a polohovací mechaniky bude teploměr zkonstruován a následně vhodně otestován na připraveném měřicím pracovišti.

V závěru práce budou také rozebrány další možnosti vylepšení či zdokonalení tohoto teploměru.

2. Teoretický rozbor

2.1 Popis a princip bolometrů a termočlánekových senzorů

3.1.1 Princip bolometru

Pro bezkontaktní měření teploty lze využít několik různých bezkontaktních senzorů. Jedním z nich je typ senzoru nazývaný bolometr.

Bolometr z řeckého bole: paprsek, pracuje na principu pyrometrie, tzn. snímání celkového vyzářeného tepelného výkonu prostřednictvím infračerveného záření. Principem bolometru je změna elektrického odporu bolometru v závislosti na jeho teplotě. Teplota je závislá na množství dopadajícího absorbovaného infračerveného záření. Množství dopadajícího záření je tedy možno určit ze změny odporu bolometru. Pro přesné měření je ale nutné samotný senzor izolovat od svého okolí tak, aby změna teploty bolometru byla úměrná pouze absorbovanému infračervenému záření. To se obvykle řeší klasickým referenčním termistorem (typu NTC), který měří teplotu pouzdra senzoru. Ve výsledku se tak musí dělat kompenzace vlivu okolní teploty T_a na měřenou teplotu objektu T_{obj} . Tato kompenzace může být implementována přímo uvnitř senzoru na Si substrátu, nebo je nutné ji provést vně senzoru.

Zjednodušeně lze tedy říci, že dopadající záření ohřívá materiál, čímž se mění odpor tohoto materiálu a podle této změny odporu se určí teplota.

3.1.2 Materiály používané v bolometrech

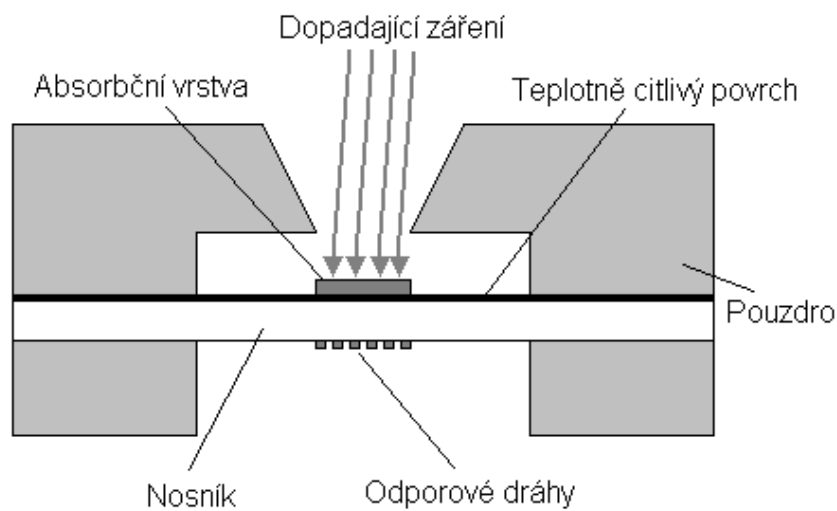
Dříve se používaly platinové odporové články. V současné době se používají polovodičové materiály:

- Termistorové Bolometry – kysličníky MgO, MnO, NiO, TiO₂ (kosmická záření)
- Vrstvové bolometry – chalkogenidové sklo TI₂SeAs₂Te₃
- Germaniové, křemíkové bolometry - chladí se na teplotu kapalného hélia, používají se při kosmických měřeních
- Supravodičové bolometry
- Pyroelektrické bolometry

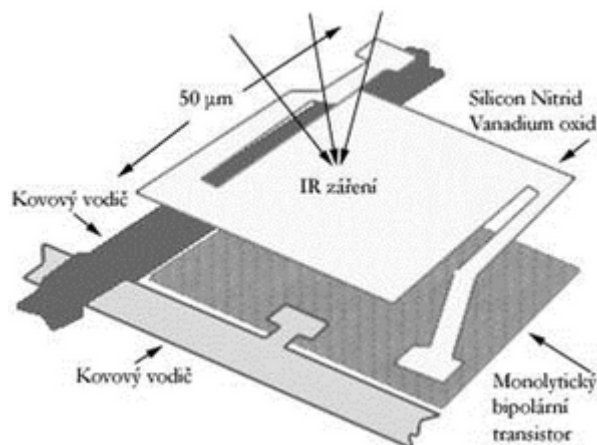
Další typické materiály bolometrů jsou oxidy vanadu, například oxid vanadičitý VO_2 . Naprosto odlišným materiálem užívaným k tvorbě bolometru je amorfni křemík.

3.1.3 Konstrukce bolometru

Strukturu bolometru znázorňuje obrázek (Obrázek 1). Infračervené záření dopadá na absorpční vrstvu senzoru tvořenou zlatou fólií, která pohlcuje až 95% záření. To ohřívá teplotně vodivý povrch i nosník. Na spodní straně nosníku je napařený meandr odporové dráhy, jejíž odpor se mění lineárně s teplotou. Příklad takové konstrukce bolometru je vidět na obrázku (Obrázek 2) [8][9].



Obrázek 1 - Struktura bolometru [9]

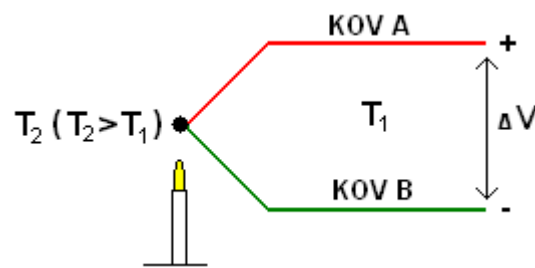


Obrázek 2 - Konstrukce bolometru [14]

3.1.4 Princip termočláňkových senzorů

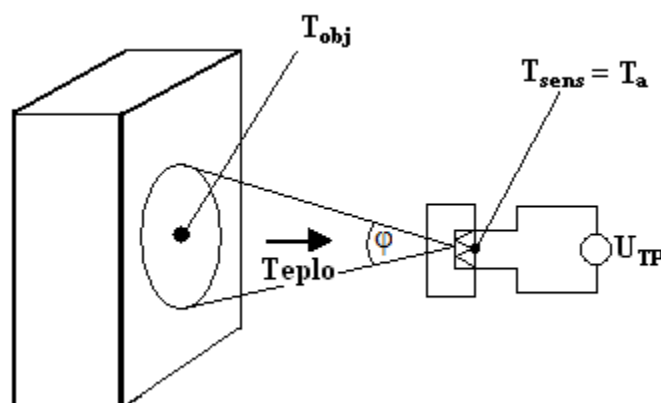
Princip termočláňkového senzoru je založen na termoelektrickém jevu (Obrázek 3). Termoelektrický jev vzniká při spojení dvou vodičů z různých kovových materiálů A a B, které jsou spolu vodivě spojeny na obou koncích. Společně spojeny jsou tyto vodiče na pevném konci a na srovnávacím konci. Na srovnávacím konci jsou vodiče spojeny přes milivoltmetr. Termoelektrické napětí ΔV závisí na rozdílu teplot T_1 a T_2 měřených míst a na druhu použitých kovů pro termočlánek. V případě, že teplota jednoho spojovací konce T_1 bude rozdílná od teploty druhého spojovacího konce T_2 , vzniká na milivoltmetru termoelektrické napětí a obvodem prochází termoelektrický proud [17]. U termočláňkových senzorů se také musí vyhodnotit teplota studené strany termočláňku pomocí termistoru.

Pro termoelektrické napětí proto platí: $\Delta U = U_{12}(T_2) - U_{12}(T_1)$



Obrázek 3 - Termoelektrický jev [16]

Na obrázku (Obrázek 4) je potom vidět měření teploty předmětu, kde úhel φ je vymezen okénkem v pouzdře senzoru, který tedy zároveň slouží jako optický filtr a vymezuje snímanou oblast.



Obrázek 4 - Měření teploty předmětu [17]

3.1.5 Materiály používané v termočláňkových senzorech

Jako materiály vhodné pro termočláňkové senzory se používají dvojice vodičů. Mezi nejrozšířenější dvojice kovů patří tyto materiály:

- niklchrom-niklhlíník
- měď-konstantan
- železo-med'nikl
- chromel-konstantan
- platinahodium-platina

Nejvíce používané termočláňky v průmyslu jsou typu železo-med'nikl (do 600 °C), pro vyšší teploty niklchrom-niklhlíník (do 1000 °C), případně platinahodium-platina (do 1300 °C) [18].

3.1.6 Emisivita

Pojmem emisivita se rozumí optická vlastnost materiálu popisující množství světla, které je vyzařeno z daného materiálu, vůči množství, které při stejné teplotě vyzařuje absolutně černé těleso. Černé těleso znamená ideální těleso pohlcující veškerá záření. Zároveň se ale také jedná o ideální zářič, jelikož záření takového tělesa je maximální a závisí pouze na teplotě. Lze tedy říci, že emisivita určuje schopnost tělesa vyzařovat teplo. Emisivita absolutně černého tělesa ϵ je rovna 1. Emisivita reálného tělesa ϵ_{real} potom může nabývat hodnot $\epsilon_{\text{real}} \leq 1$. Výpočet emivity se provádí přes intenzitu vyzařování, tedy $\epsilon = H_{\text{real}}/H_{\text{abs}}$, kde H_{real} je intenzita vyzařování reálného tělesa a H_{abs} je intenzita vyzařování absolutně černého tělesa.

Emisivita je závislá na druhu materiálu, stavu materiálu, směru vyzařování, vlnové délce a polarizaci světla. Příklady hodnot emivity vybraných druhů materiálů jsou znázorněny v tabulce (Tabulka 1).

leštěná měď	0,01
Hlíník leštěný	0,05
papír	0,90
sklo	0,92
dřevo	0,90

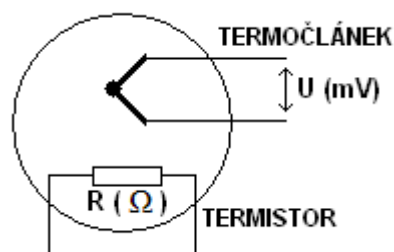
Tabulka 1 - Emivity vybraných materiálů [15]

Pro přesné určení teploty materiálu je tedy nutné přesně určit emisivitu daného materiálu. Ve své práci použiji senzor s obecnou hodnotou emisivity $\varepsilon = 1$. Proto v závěrečném testování musím počítat s určitou chybou vlivem nepřesného určení emisivity materiálu. Při pozdějším plošném snímání daného předmětu ale nebude určení přesné teploty tak důležité. Hlavním cílem bude výsledný obraz nasnímaného předmětu, kde budou zřetelné teplotní přechody.

3.1.7 Senzor ZTP 135SR

Mnou použitý senzor bude termoelektrický senzor ZTP-135SR od firmy „General Electric“. Jedná se o termočlánekový senzor pracující na infračerveném záření. Zároveň senzor obsahuje termistor určující hodnotu teploty v okolí měřeného předmětu. Vše je usazené v pouzdře typu TO-46(18). Výrobce tohoto senzoru uvádí, že má vysokou citlivost a termistor pro kompenzaci okolní teploty. Zjednodušené vnitřní zapojení tohoto senzoru je vidět na obrázku (Obrázek 5).

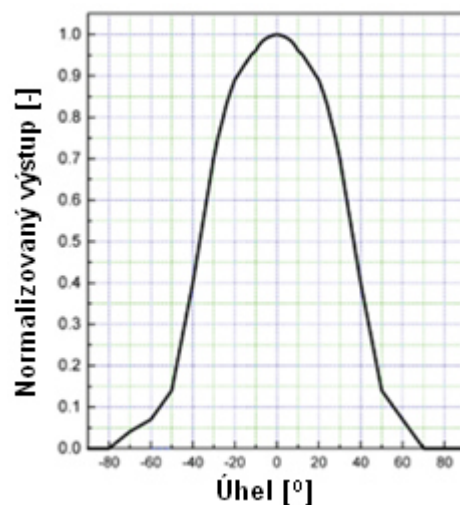
Popis funkce senzoru je následující: Základem je „defaultní-absolutní“ hodnota teploty okolí, ze které senzor vychází. Výrobce tuto hodnotu určil na 25 °C. Senzor obsahuje dva vnitřní senzory. Jedním je termočlánek a druhým je termistor. Proto má senzor 4 vývody – dva pro termistor a dva pro termočlánek. Termočlánek měří aktuální teplotu snímaného objektu a termistor měří teplotu okolí. Protože výrobce určil teplotu 25 °C jako výchozí, znamená to, že při této teplotě okolí bude hodnota teploty naměřená termočlánekem skutečnou hodnotou teploty snímaného objektu. Pokud je hodnota okolní teploty jiná než 25 °C, je nutné od skutečné okolní teploty odečíst výchozí hodnotu teploty, tedy 25 °C a rozdíl těchto dvou hodnot se musí odečíst od hodnoty, kterou naměřil termočlánek.



Obrázek 5 - Znárodnění vnitřního zapojení termoelektrického senzoru

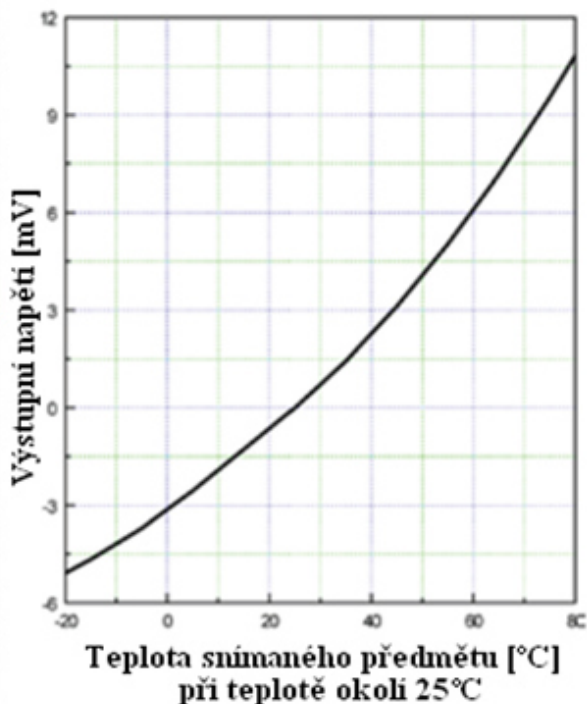
Termočlánek měří rozdíl teploty kontaktního plíšku senzoru a teploty pouzdra senzoru. Právě díky rozdílu teplot dvou materiálů vzniká rozdílné kontaktní napětí na přechodu obou kovů. Převodní graf napětí na teplotu je uveden na obrázku (Obrázek 7) vpravo. Napětí se pohybuje v rozmezí cca od -5 mV do 10,5 mV, čemuž odpovídá teplota od -20 °C do 80 °C. Oproti tomu termistor hodnotu teploty vyjadřuje hodnotou odporu a vytváří tak jakousi absolutní hodnotu, která vychází z hodnoty 25 °C. Opět i pro termistor je převodní tabulka z odporu na napětí uvedena na obrázku (Obrázek 7) vlevo. Hodnota odporu se pohybuje od cca 6,5 kΩ do 950 kΩ, čemuž odpovídá teplota v rozmezí od -20 °C do 100 °C.

Je tedy zřejmé, že senzor je schopný pracovat s teplotním rozsahem -20 °C do 100 °C. Dále je výrobcem uváděno, že při úhlovém rozsahu detekce tohoto senzoru od -40 ° do 40 ° je výstup 50%. S vyšším úhlem detekce je výstup méně přesný. Maximální přesnost bude v rozmezí od -15 ° do 15 ° tedy 30 ° záběru, kde bude výstup vyšší než 90 % dle obrázku (Obrázek 6).



Obrázek 6 - Závislost účinnosti na zorném úhlu senzoru [1]

T _{amb} (°C)	R _{min} (kΩ)	R _{cent} (kΩ)	R _{max} (kΩ)
-20	909,1	947,9	987,3
-15	687,7	715,9	744,7
-10	524,5	545,4	566,5
-5	403,3	418,8	434,5
0	312,6	324,1	335,8
5	244,0	252,7	261,5
10	191,8	198,5	205,1
15	151,9	156,9	162,0
20	121,0	124,9	128,8
25	97,00	100,0	103,0
30	78,05	80,55	83,06
35	63,16	65,25	67,36
40	51,39	53,15	54,91
45	42,03	43,51	45,00
50	34,54	35,79	37,05
55	28,52	29,58	30,65
65	19,70	20,47	21,25
70	16,48	17,14	17,81
75	13,83	14,40	14,98
80	11,66	12,15	12,65
85	9,867	10,29	10,72
90	8,380	8,745	9,118
95	7,143	7,460	7,785
100	6,111	6,388	6,670



Obrázek 7 - Převodní tabulka odporu na teplotu a graf převodu napětí na teplotu [1]

Příklad naměřených hodnot a následného přepočtu na teplotu s kompenzací teploty okolí:

Výpočet naznačím na předmětu, který bude mít například 35 °C (což odpovídá teplotě lidské ruky). Teplota okolí - pouzdra, kde budu teplotu ruky měřit, bude například 10 °C.

Na vývodech termistoru tedy dostanu hodnotu odporu cca 200 kΩ, která bude dle datasheetu odpovídat teplotě 10 °C. Tuto hodnotu teploty odečtu od výchozí hodnoty tj. 25 °C tedy:

$25\text{ °C} - 10\text{ °C} = 15\text{ °C}$. Tím jsem si zjistil absolutní hodnotu okolí a pomocí této hodnoty po odečtení od hodnoty, kterou mi ukáže termočlánek, provedu kompenzaci vlivu okolní teploty.

Termočlánekové vývody tak vzhledem k absolutní hodnotě teploty 10 °C budou ukazovat hodnotu napětí odpovídající teplotě 50 °C, čemuž odpovídá napětí cca 4 mV.

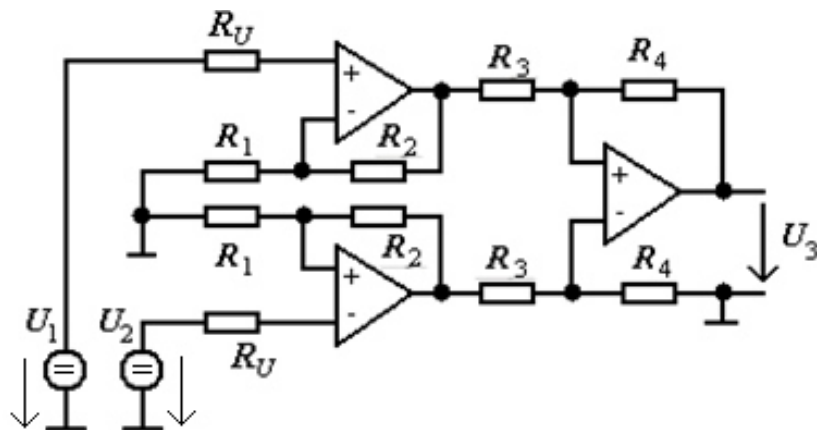
Výslednou teplotu měřeného předmětu zjistím tak, že od hodnoty, kterou mi ukázal termočlánek, odečtu vypočtenou hodnotu z termistoru. Tedy:

$50\text{ °C} - 15\text{ °C} = 35\text{ °C}$.

2.2 Vyhodnocovací jednotka pro termočlánekový výstup senzoru

Jak již bylo popsáno výše, na termočlánekovém výstupu senzoru naměřím hodnotu napětí v rozmezí od -5 mV do 10,5 mV. Je tedy nutné takovýto rozsah napětí zesílit tak, aby byla hodnota napětí lépe identifikovatelná. Napětí v milivoltech je velice nízké a tak by při vyhodnocování přímé hodnoty z termočláneku mohlo docházet k častým chybám. Například vzniklým šumem, který může mít hodnotu právě v jednotkách milivoltů.

Vzhledem k tomu, že mnou zesilované napětí bude stejnosměrné, bude zapotřebí vybrat takový typ zesilovače, který bude mít dostatečné zesílení, vysoký vstupní odpor a velké potlačení souhlasného signálu. Základním prvkem pro zesílení stejnosměrného signálu je operační zesilovač, který má dva vstupy (invertující – a neinvertující +). Nevýhodou samostatně zapojeného operačního zesilovače, ať už invertujícího, nebo neinvertujícího, je to, že nemá nijak kompenzované chyby způsobené nedokonalým připojením zesilovaného signálu. Tím vznikají zdroje chyb, jako je napěťový offset nebo nenulové vstupní proudy. Tyto chyby jdou do jisté míry odstranit použitím vhodného operačního zesilovače (např.: TL071), který má výrobcem vytvořenou kompenzaci offsetu vhodným přidáním odporového trimru. Mnohem účinnější pro potlačení vnitřního odporu zdroje signálu je zapojení operačního zesilovače jako rozdílového zesilovače. Toto zapojení zesiluje rozdílové napětí vstupních signálů $U_D = (U_2 - U_1)$ a zároveň potlačuje souhlasný signál $U_C = (U_1 + U_2)/2$. Problémem ale stále zůstává spojení vstupních svorek rozdílového zesilovače přes zdroj signálu. Například, nedokonalým připojením elektrod od zdroje signálu na vstupní svorky rozdílového zesilovače, může dojít k rozhození vstupní napěťové symetrie. Tento problém řeší sledovače zapojené na každé vstupní svorce rozdílového zesilovače. Schéma zapojení takového zesilovače je na obrázku (Obrázek 8).

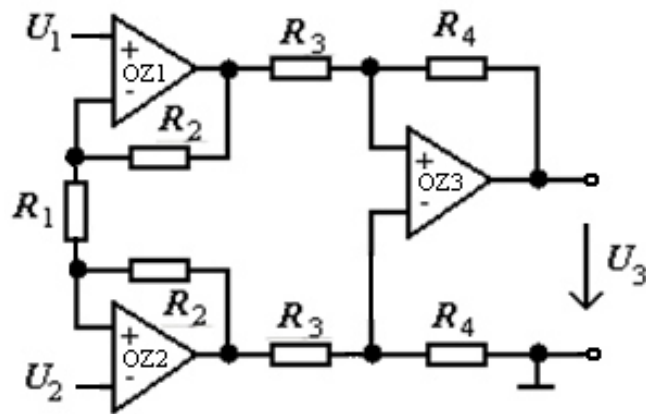


Obrázek 8 - Schéma zapojení rozdílového zesilovače se sledovači [3]

Pro řízení zesílení pouze jedním prvkem (odporem R_1) je lepší zapojení dle obrázku (Obrázek 9). Takovému zapojení se říká přístrojový zesilovač. Zesílení takového přístrojového zesilovače je dáno vztahem:

$$\frac{U_3}{U_2 - U_1} = \left(1 + \frac{2R_2}{R_1}\right) \frac{R_4}{R_3} \quad (1)$$

Principem přístrojového zesilovače je potlačení souhlasného signálu. I když by ideálně invertující a neinvertující vstupy rozdílového zesilovače OZ3 měli mít shodné zesílení díky rovnajícím se odporům R_3 a odporům R_4 , tak například nedokonalým připojením elektrod vstupních zdrojů, které chci zesilovat, mi mohou vytvořit odpor na jednom ze vstupů rozdílového zesilovače OZ3 a tak rozhodit shodné zesílení obou vstupů, což způsobuje chybu v podobě zesílení souhlasného signálu. Řešením je oddělit oba vstupy rozdílového zesilovače sledovačem, který vstupy impedančně oddělí. Sledovače tvoří operační zesilovače OZ1 a OZ2. Zároveň jsou tyto sledovače použity jako podpůrné zesilovače pro rozdílový zesilovač a zdokonalí tak ještě zesílení. Toho docílím zapojením jen jednoho odporu R_1 mezi dva odpory R_2 . Potom dostávám úplné zapojení přístrojového zesilovače, kde je zesílení řízeno jedním odporem a to odporem R_1 .



Obrázek 9 - Schéma zapojení přístrojového zesilovače [3][22]

Výsledné výstupní napětí U_3 je tedy dáno vztahem:

$$U_3 = (U_2 - U_1) \cdot A_D \quad (2)$$

Kde tedy výsledné diferenční zesílení bude:

$$A_D = \frac{U_3}{U_D} = \left(1 + \frac{2R_2}{R_1}\right) \frac{R_4}{R_3} \quad (3)$$

Je tedy zřejmé, že vzorec (3) platí právě tehdy, když jsou odpory shodné dle obrázku (Obrázek 9). Pro výpočet činitele potlačení souhlasného signálu CMRR je nutné znát souhlasné zesílení, které je dáno vztahem:

$$A_C = \frac{U_3}{U_C} \quad (4)$$

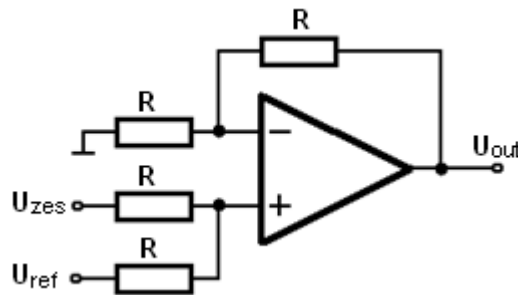
Činitel potlačení souhlasného signálu CMRR je potom dán vztahem:

$$CMRR = \frac{A_D}{A_C} = 20 \log \frac{A_D}{A_C} [dB] \quad (5)$$

Výsledkem tedy bude vyhovující zesilovač, který značně potlačuje šum a dostatečně dobře zesiluje rozdílový signál [3][22].

Jelikož pozdější vyhodnocení a zobrazení hodnoty teploty bude pomocí displeje přes mikrokontrolér, bude nutné pro jednodušší práci s mikrokontrolérem posunout rozsah napětí do kladných hodnot, protože termočlánek pracuje v rozmezí od -5mV do 10,5mV. Bude tedy nutné použít nějaké referenční napětí o kladné hodnotě, které se přičte k zesílenému napětí z přístrojového zesilovače pomocí sčítačky vytvořené

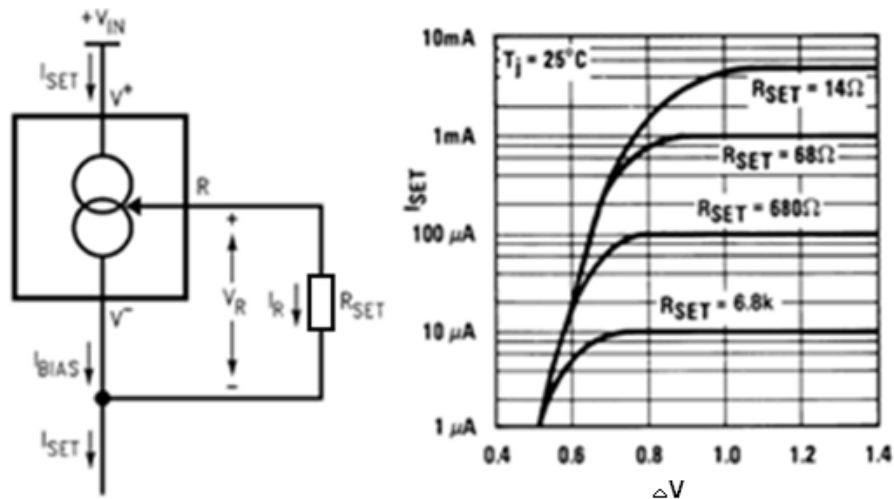
z operačního zesilovače. Výstupní napětí na sčítačce potom bude $U_{out} = U_{ref} + U_{zes}U$.
Výsledné zapojení sčítačky je na obrázku (Obrázek 10).



Obrázek 10 - Schéma zapojení neinvertující sčítačky

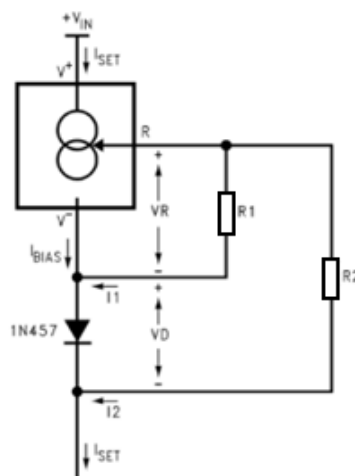
2.3 Vyhodnocovací jednotka pro termistorový výstup senzoru

Výstup z vývodů termistoru bude v podobě hodnoty odporu. Aby byla hodnota odporu zjištěna, je nutné na termistorové vývody přivést proud a poté na odporu změřit hodnotu napětí. Následně díky známému proudu a zjištěné hodnotě napětí dopočtu hodnotu odporu dle Ohmova zákona. Proto bude nutné vytvořit zdroj konstantního proudu, tedy proudovou referenci. Potom je možné ze známého proudu a naměřeného napětí určit hodnotu odporu dle Ohmova zákona. Protože budu chtít vytvořit takový zdroj proudu, který bude teplotně co nejméně ovlivňovat senzor, bude zapotřebí zvolit takovou hodnotu referenčního proudu, při které se bude obvod co nejméně zahřívat. Je tedy zřejmé, že ideální je co nejmenší hodnota proudu. Pro mé účely je vyhovující hodnota jednotek μA . Mnou zvolená proudová reference je reference typu LM334. Tato reference nabízí proud v rozmezí od $1 \mu\text{A}$ do 10mA .



Obrázek 11 - Základní zapojení proudové reference LM334 vlevo a graf závislosti výstupního proudu na rozdílu napětí ΔV ($V+$ a $V-$) vpravo [4]

Základní zapojení obvodu LM334 je na obrázku (Obrázek 11) vlevo. Celý obvod je nastavován jediným odporem R_{SET} , podle grafu na obrázku (Obrázek 11) vpravo. Mnou zvolená hodnota proudu bude $10 \mu A$. Této hodnotě odpovídá hodnota odporu $R_{SET} = 6,8 k\Omega$. Napájecí napětí pro takovouto hodnotu proudu je od 0,8 V do 40 V dle grafu a datasheetu. Po takovémto nastavení hodnot řídicích prvků obvodu LM334 dostávám proud $I_{SET} = 10 \mu A$. Takto zvolený způsob zapojení obvodu LM334 má ovšem tu nevýhodu, že není nijak teplotně kompenzován. Proto ve své práci použiji zapojení s teplotní kompenzací, které doporučuje výrobce. Zapojení s teplotní kompenzací doporučené výrobcem je vidět na obrázku (Obrázek 12). Kompensace je v obvodu zajištěna diodou 1N457, která má pokles napětí $-2,5 mV/^{\circ}C$, což bude dostačující teplotní kompenzace pro mou práci.

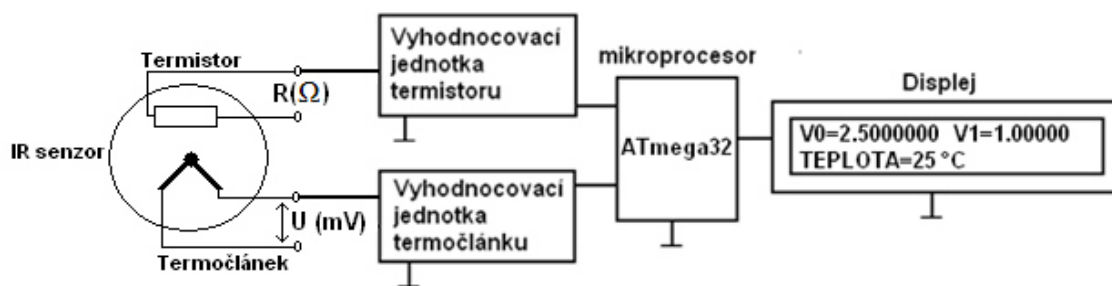


Obrázek 12 - Zapojení proudové reference LM334 s teplotní kompenzací [4]

2.4 Vyhodnocovací jednotka pro zobrazení jedné teploty na alfanumerickém displeji

Oba dva výstupy ze senzoru budou nejprve zapojeny do analogové části vyhodnocovací jednotky, která již byla popsána výše. Po nutné úpravě těchto výstupů v analogové části budou výstupy přivedeny do části digitální. V této části bude nutné použití mikrokontroléru a displeje. Jako mikrokontrolér použiji mikrokontrolér ATmega32. Tento mikrokontrolér obsahuje velké množství periférií, z nichž některé postupně využiji ve své práci. Mezi hlavní periférie patří: AD převodník, PWM signál generovaný čítačem / časovačem a USART komunikační rozhraní. Právě pomocí AD převodníku budou analogové hodnoty získané z termočlánu a termistoru převedeny do hodnot digitálních a následně zpracovány tak, aby z nich byla získána hodnota teploty.

V první části mé práce použiji dvouřádkový displej s 16 znaky na řádek. Na prvním řádku displeje se budou zobrazovat aktuální hodnoty napětí jak z termočlánu, tak z termistoru senzoru. Bude tedy nutné vytvořit program, který hodnoty z obou výstupů senzoru po analogové úpravě převede na digitální hodnoty a následně je zobrazí na displeji. Poté bude zapotřebí vytvořit program pro přepočítání těchto dvou hodnot napětí na jednu aktuální teplotu snímaného objektu. Tuto výslednou teplotu budu zobrazovat na druhém řádku displeje. Celé zapojení vyhodnocovací jednotky senzoru je potom vidět na obrázku (Obrázek 13).

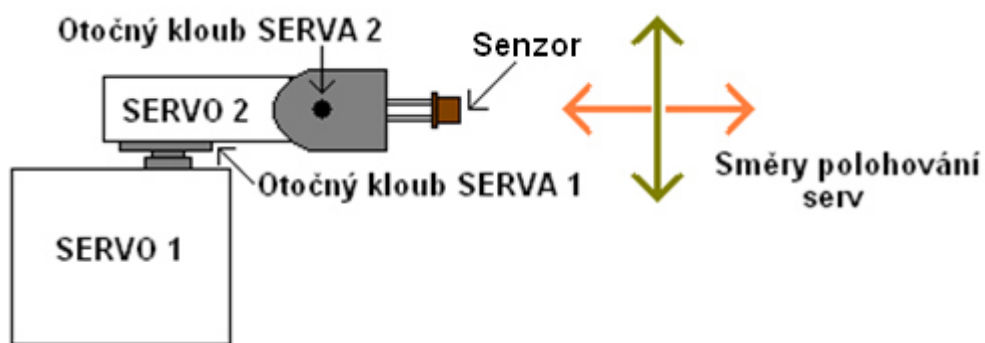


Obrázek 13 - Kompletní zapojení vyhodnocovací jednotky pro zobrazení jedné teploty

Dalším úkolem v této části bude omezení snímaného úhlu senzoru. Toho docílím použitím hliníkové trubičky, ve které bude senzor umístěn. Tato trubička by měla částečně zvětšit dosah detekční vzdálenosti senzoru a zároveň omezit detekční úhel senzoru na určitou hodnotu, dle použitého průměru trubičky. Toto úhlové omezení bude později důležité pro přesné nastavení polohování servomotorů.

2.5 Řídicí jednotka pro servomotory

Jedním z hlavních úkolů mé práce bude vytvoření polohování senzoru za účelem zpřesnění informace. Tím získám pro každou polohu senzoru jednu hodnotu teploty a tak bude možné později z nasnímaných hodnot teplot sestavit přesnější obraz snímaného objektu. Pro polohování použiji sestavu dvou modelářských servomotorů (SERVO 1 a SERVO 2). SERVO 1 bude sensor polohovat ve vodorovném směru, SERVO 2 bude sensor polohovat ve svislém směru. Sensor bude umístěn na SERVO 2. Celá sestava je vidět na obrázku (Obrázek 14). Servomotor, zkráceně servo, je synchronní motor s permanentním magnetem na rotoru a s třífázovým vinutím ve statoru. Servomotory se od běžných motorů liší zejména tím, že u nich lze nastavit přesně polohu natočení osy. Vzhledem k tomu, že v mé práci budu potřebovat polohování po desítkách stupňů, bude právě servomotor vhodnou volbou pro přesné polohování senzoru.

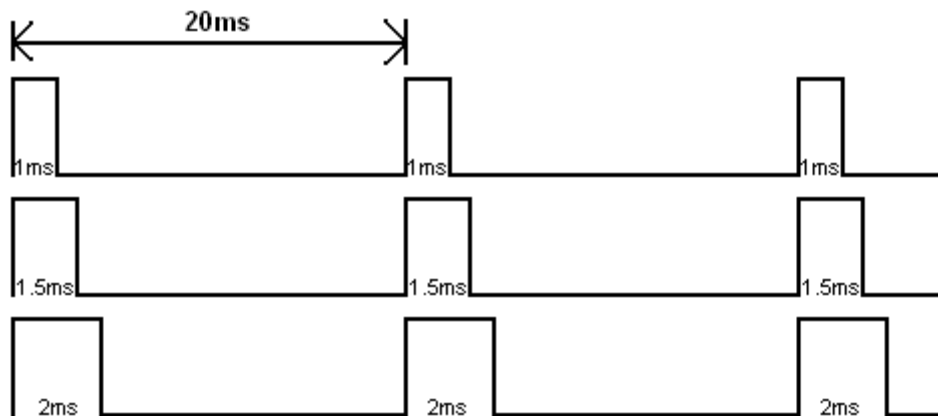


Obrázek 14 - Sestava senzoru a dvou servomotorů

Modelářské servo je nejčastěji napájeno napětím v rozmezí od 4,8 V do 6 V. Komunikace probíhá přes tři vodiče, černý-záporná svorka napájení (zem), červený-kladná svorka napájení a žlutý-řídící impulzy. Řídící impulzy jsou vytvořeny PWM signálem s periodou 20 ms tj. s frekvencí 50 Hz. Amplituda impulsu bývá v rozmezí od 3 V do 5 V. Šířka impulsu potom bývá v rozmezí od 1 ms do 2 ms. Aby bylo servo stále řízeno a požadovaná poloha udržována, je nutné servo řídit kontinuálně. Nejběžnější pohyb hřídele je od 0 ° do 90 ° (u některých servomotorů až do 180 °). Obvyklé šířky pulzů pro jednotlivé polohy servomotorů jsou:

- 1 ms pro levou krajní polohu (0 °)
- 1,5 ms pro střední polohu (45 °)
- 2 ms pro pravou krajní polohu (90 °)

Průběh takovýchto pulzů potom bude podle obrázku (Obrázek 15).

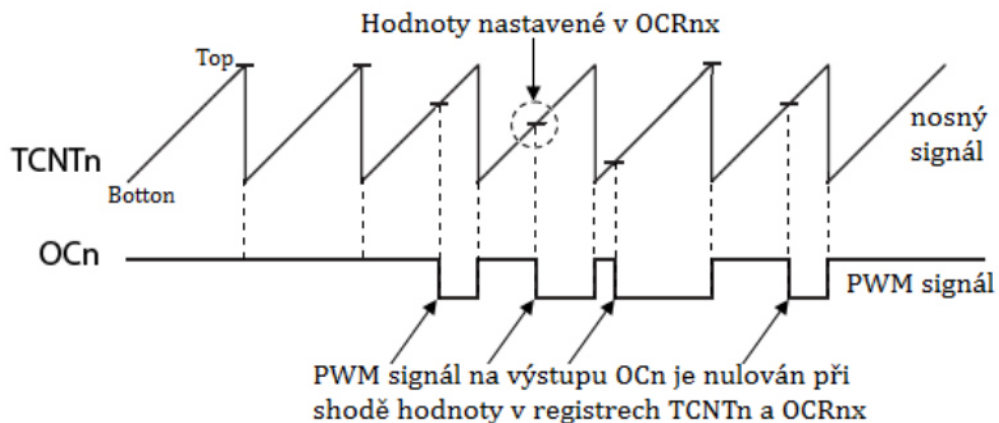


Obrázek 15 - Průběh generovaného PWM signálu ve středních a krajních polohách

Pro řízení těchto servomotorů bude využito generování PWM signálu pomocí mikrokontroléru ATmega32. Mikrokontrolér ATmega32 obsahuje dva 8 bitové čítače / časovače a jeden 16 bitový čítač/časovač. Práce s jednotlivými čítači/časovači je velmi obdobná, proto dále budu popisovat generování PWM čítačem/časovačem 0.

Čítač/časovač 0 může sloužit k vyvolání přerušení, jakmile dojde k přetečení hodnoty čítače, nebo jakmile dojde ke shodě registru TCNT0 s nastavenou hodnotou registru OCR0. Další možností jak využít čítač / časovač 0 je generování PWM signálu. Ten lze generovat ve dvou pracovních režimech. Prvním z nich je rychlý režim PWM, druhým je potom fázově korigovaný režim.

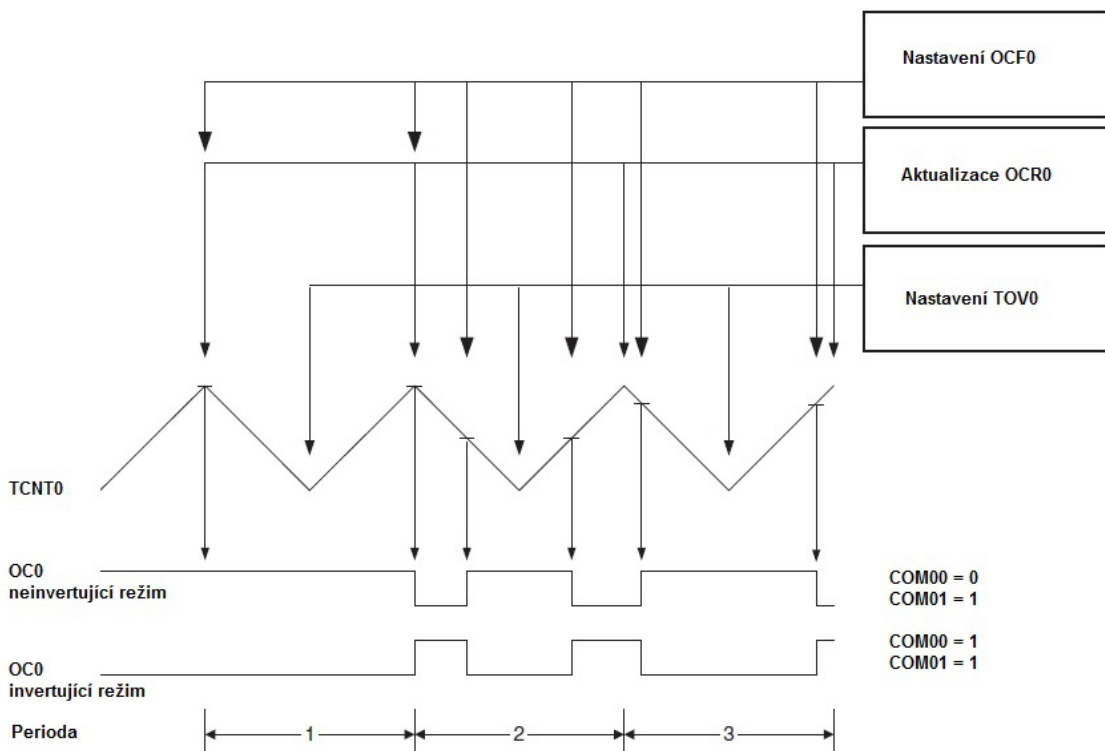
- **Rychlý režim PWM**



Obrázek 16 - Princip generování PWM signálu v režimu „Rychlý režim PWM“ [10]

Popis funkce generování PWM signálu v rychlém režimu PWM je vidět na obrázku (Obrázek 16). Z něj je patrné, že generování signálu je řízeno dvěma registry. Registr TCNTn, který určuje minimální a maximální hodnotu nosného signálu a registr OCRnx, který určuje do jaké hodnoty má být PWM signál v logické jedničce. Potom PWM signál, který je generován na výstupu OCn, je z logické jedničky nastaven do logické nuly právě při shodě obou hodnot v registrech TCNTn a OCRnx.

- **Fázově korigovaný režim PWM**



Obrázek 17 - Princip generování PWM signálu v režimu „Fázově korigovaný režim PWM“ [10]

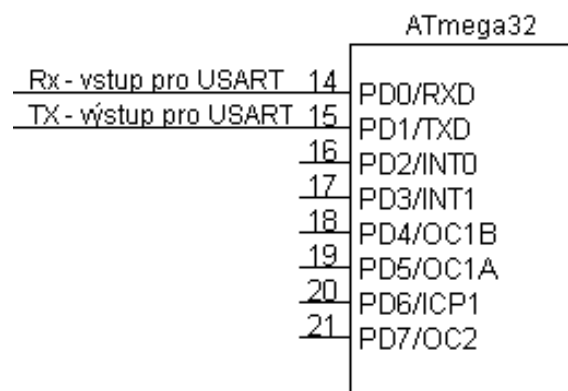
Na obrázku (Obrázek 17) je znázorněn princip činnosti fázově korigovaného režimu PWM, který se od rychlého režimu PWM liší v tom, že registr TCNT0 čítá nahoru opět až do maxima (hodnota 0xFF), ale po dosažení maximální hodnoty (hodnota „přetečení“) se nenastaví na nulu, ale registr čítá dolů. Tento režim má lepší rozlišení než rychlý režim PWM a to i přesto, že má oproti tomuto režimu nižší pracovní kmitočty. I zde dochází k porovnávání registrů TCNT0 a OCR0. K porovnávání zde ale dochází jak při čítání nahoru, tak i při čítání dolů. V případě shody obou hodnot registrů dojde k přenastavení výstupního stavu OC0 podle nastavených bitů COM00 a COM01 v registru TCCR0. Příznak přetečení TOV0 je v tomto režimu aktivován při dosažení

nuly registrem TCNT0. Fázově korigovaný režim PWM se vybírá nastavením bitů WGM00 = 1 a WGM01 = 0 v registru TCCR0.

2.6 Vyhodnocovací jednotka pro zobrazení matice teplot v terminálu na osobním počítači pomocí USART komunikace

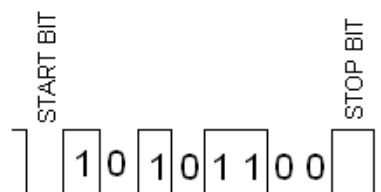
Protože díky polohování senzoru servomotory získám matici hodnot teploty o rozměru 10×10, bude zapotřebí takovouto matici hodnot nějak zobrazit. Pro zobrazení plošného rozložení teploty v měřené oblasti použiji USART rozhraní.

USART (Universal Synchronous / Asynchronous Receiver and Transmitter) je synchronní a asynchronní sériové komunikační rozhraní pro obousměrný přenos dat mezi zařízeními. Komunikace probíhá po dvou datových vodičích. První slouží pro vysílání datových rámců, vodič TX (transmit) a druhý slouží k přijímání datových rámců, vodič RX (receive). Zapojení USART k mikrokontroléru ATmega32 je potom vidět na obrázku (Obrázek 18).



Obrázek 18 - Zapojení USART k ATmega32

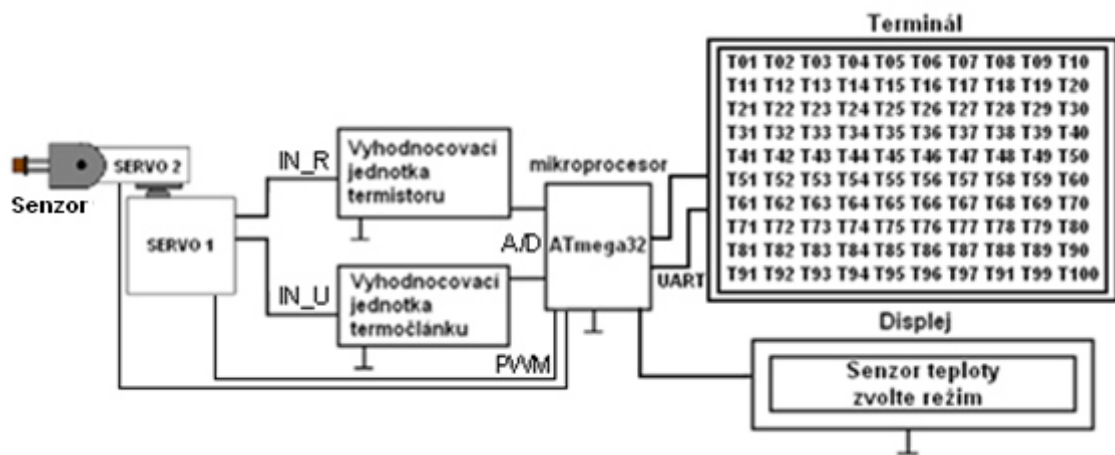
Přenos dat probíhá v datových rámcích, které mohou mít 5 až 9 bitů. Tyto rámce začínají jedním start bitem a končí jedním stop bitem tak, jak je vidět na obrázku (Obrázek 19), kde odesílanými daty je hodnota 00110101. Navíc ještě může každý rámeček obsahovat paritní bit, který slouží pro kontrolu správnosti rámečku.



Obrázek 19 - Příklad datového rámečku USART

Mikrokontrolér ATmega32 může po tomto rozhraní současně vysílat i přijímat. Umí jak synchronní tak asynchronní přenos. Podporuje délku rámců od 5 do 9 datových bitů a 1 až 2 stop bity. V režimu asynchronní přenos umožňuje zdvojnásobit přenosovou rychlost. Pro správnou funkci USART pomocí mikrokontroléru ATmega32 bude zapotřebí inicializace. Ta je řešena pomocí registrů UCSRA, UCSRB a UCSRC, kde každý bit těchto registrů má jinou funkci. Pro nastavení přenosové rychlosti slouží registry UBRRL a UBRRH [13].

Pro pozdější komunikaci mikrokontroléru s osobním počítačem bude nutné toto komunikační rozhraní převést na rozhraní USB, přes které se snadno spojí mikrokontrolér s osobním počítačem. Bude tedy nutné použití převodníku USART/USB. Výsledné blokové schéma celého senzoru je na obrázku (Obrázek 20).



Obrázek 20 - Zapojení se zobrazením na terminálu

Hodnoty načtené do matice o rozměru 10×10 jsou vidět na obrázku (Obrázek 21). Výsledkem bude tedy 100 hodnot teploty, kde každá teplota bude odpovídat jedné souřadnici polohy SERVO 1 a SERVO 2. Na obrázku (Obrázek 21) je vidět, že například poloze SERVO 1 = 25 ° a SERVO 2 = 5 ° odpovídá teplota na pozici pole T48.

poloha SERVA 1										
-45°	-35°	-25°	-15°	-5°	5°	15°	25°	35°	45°	
T01	T02	T03	T04	T05	T06	T07	T08	T09	T10	45°
T11	T12	T13	T14	T15	T16	T17	T18	T19	T20	35°
T21	T22	T23	T24	T25	T26	T27	T28	T29	T30	25°
T31	T32	T33	T34	T35	T36	T37	T38	T39	T40	15°
T41	T42	T43	T44	T45	T46	T47	T48	T49	T50	5°
T51	T52	T53	T54	T55	T56	T57	T58	T59	T60	-5°
T61	T62	T63	T64	T65	T66	T67	T68	T69	T70	-15°
T71	T72	T73	T74	T75	T76	T77	T78	T79	T80	-25°
T81	T82	T83	T84	T85	T86	T87	T88	T89	T90	-35°
T91	T92	T93	T94	T95	T96	T97	T98	T99	T100	-45°

Obrázek 21 - Rozložení matice teplot o rozměru 10×10

V terminálu potom bude zobrazeno 100 hodnot teploty. Tyto hodnoty pak pomocí programu Microsoft Office Excel převedu do barevných odstínů v závislosti na velikosti hodnoty. Výsledkem tedy bude teplotní obraz snímaného objektu. Zobrazení bude pomocí barevných odstínů, kdy se vždy zjistí nejnižší a nejvyšší hodnota teploty v nasnímané matici 10×10 a těmto krajním teplotám se přiřadí nadefinovaný odstín. Odstín pro nejnižší hodnotu teploty bude například šedý a pro nejvyšší teplotu bude například červený. K hodnotám mezi těmito krajními hodnotami se přiřadí další odstíny barev tak, aby vznikl obraz nasnímaného objektu.

3. Návrh analogové části

3.1 Návrh vyhodnocení pro termočlánek

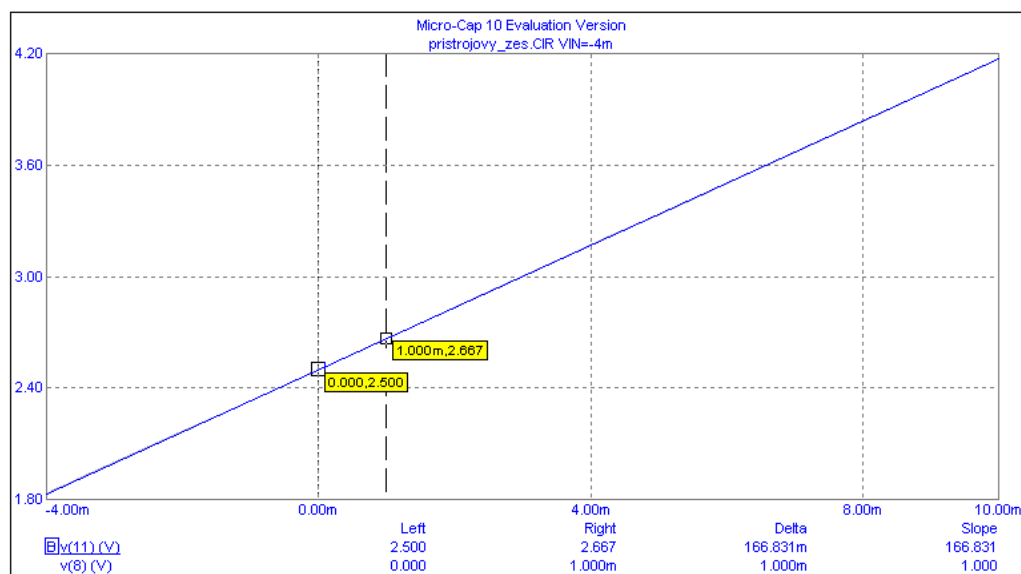
Výstup ze senzoru na termočlánekových vývodech je v podobě hodnoty napětí. Protože se ale jedná o velmi nízké napětí, je nutné ho zesílit pomocí přístrojového zesilovače. Následně musím posunout rozsah hodnot napětí do kladných úrovní, abych si usnadnil pozdější práci s mikrokontrolérem. To vytvořím pomocí sčítačky napětí s nějakým vhodně zvoleným referenčním napětím. Protože ale moje sčítačka invertuje, je potřeba na výstupu sčítačky zařadit ještě invertor, který rozsah převrátí do mnou požadovaných kladných hodnot.

3.1.1 Návrh přístrojového zesilovače

Prvotním krokem, který jsem si musel před návrhem samotného přístrojového zesilovače rozmyslet, byla představa o tom, jaké budu potřebovat zesílení. Protože hodnoty, které dostávám ze senzoru, jsou v rozmezí od -5 mV do $10,5\text{ mV}$, budu potřebovat takové zesílení, které mi posune tento rozsah do hodnot, které bude mikrokontrolér snadněji a přesněji vyhodnocovat. Mnou představovaný rozsah po zesílení by měl být například od -1 V do 2 V , kde -1 V odpovídá právě -5 mV a 2 V odpovídají $10,5\text{ mV}$. Protože je ale přístrojový zesilovač invertující, bude ve skutečnosti hodnota -1 V převrácena na hodnotu 1 V a hodnota 2 V převrácena na hodnotu -2 V . Tomuto potom odpovídá zesílení přibližně $A = 175$. Důvod, proč jsem zvolil posunutý rozsah od -1 V do 2 V (přesněji od -2 V do 1 V), je prostý. Maximální hodnotu napětí, kterou mohu přivést na mikrokontrolér je $5,5\text{ V}$. Protože později zařadím do obvodu napěťovou referenci s hodnotou $2,5\text{ V}$, která mi rozsah posune od $0,5\text{ V}$ do $3,5\text{ V}$, dostávám ve výsledku vhodný rozsah pro mikrokontrolér s maximální hodnotou $3,5\text{ V}$ a tak mám zajištěno, že napětí ze senzoru je vhodně zesíleno tak, aby ho mikrokontrolér zvládl zpracovat. Tímto jsem tedy vyřešil zesílení signálu, posun rozsahu do kladných hodnot a připravení signálu pro mikrokontrolér vhodně zvoleným rozsahem napětí.

Z již uváděné rovnice (3) si mohu vyjádřit řídicí rezistor R_1 tedy:

Tím jsem tedy navrhnul přístrojový zesilovač s kompenzací offsetů a zesílením cca $A = 175$, řízený jediným rezistorem $R_G = 1,2 \text{ k}\Omega$, kde rezistor R_G odpovídá rezistoru R_1 na obrázku (Obrázek 9). Takto zapojený přístrojový zesilovač jsem si ověřil v simulátoru „MicroCap“ a zároveň jsem ho realizoval na nepájivém poli. Jak je vidět na grafu (Obrázek 23), na vstup přístrojového zesilovače (osa x) přivádím napětí o hodnotě -4 mV až 10 mV a sleduji výstup za sčítačkou (osa y). Z obrázku je dále patrné, že například při vstupní hodnotě do přístrojového zesilovače -1 mV je výstupní hodnota 2,667 V, tedy vstupní hodnota je 167× zesílena a sečtená s hodnotou reference 2,5 V. Simulací tedy byla ověřena správnost navrženého přístrojového zesilovače se sčítačkou.



Obrázek 23 - Simulace přístrojového zesilovače

Takto realizovaný zesilovač je sice v simulátoru dostatečně přesný, ovšem realizovaný přístrojový zesilovač na nepájivém poli je i přes kompenzaci offsetů pomocí trimerů značně nepřesný. Zároveň je nutné takovýto přístrojový zesilovač poměrně složitě sestavovat a ladit. V mé práci proto použiji integrovaný obvod AD620. Zesilovač AD620 je nízko-příkonový přístrojový zesilovač, který je výhodný zejména pro vysokou přesnost zesílení a vysokou stabilitu zesílení. Další výhodou je fakt, že přístrojový zesilovač AD620 je neinvertující a tak má velký vnitřní odpor z čehož vyplývá, že vnitřní odpor termočlánku mohu dále zanedbat. AD620 obsahuje přístrojový zesilovač na jednom čipu a tak zejména chyba vlivem nestejných odporů bude odstraněna. Zároveň nám integrace na jednom čipu zaručí teplotní stabilitu, kompenzaci offsetu a odolnost vůči rušení vyvolané okolním prostředím. Navíc se

zapojení zjednoduší, protože přístrojový zesilovač bude složen pouze z jednoho integrovaného obvodu a řídicího odporu R_G . Další výhodou tohoto zapojení bude i fakt, že přístrojový zesilovač AD620 je neinvertující a tak nebude potřeba použití invertoru. Vlastnosti, které má přístrojový zesilovač AD620, jsou vidět v tabulce (Tabulka 2).

Tabulka základních vlastností AD620	
Napájecí napětí	od $\pm 2,3$ V do ± 18 V
Zesílení	1 až 1000
Offset	50 μ V
Drift offsetu	0,6 μ V/ $^{\circ}$ C
Proudový odběr	1,3 mA
CMRR(G=10)	100 dB

Tabulka 2 - Přehled základních vlastností přístrojového zesilovače AD620 [11]

Zesílení takového zesilovače je dáno rezistory R_1 , R_2 , R_3 , R_4 , R_5 a R_6 . Jejich hodnoty dle katalogového listu jsou následující:

$$R_1 = R_2 = 24,9 \text{ k}\Omega,$$

$$R_3 = R_4 = R_5 = R_6 = 10 \text{ k}\Omega.$$

Dosažením těchto hodnot rezistorů do rovnice (3) dostávám vztah:

$$A_D = \left(1 + \frac{2R_1}{R_G}\right) \frac{R_5}{R_3} = \left(1 + \frac{2 \cdot 24,9 \cdot 1000}{R_G}\right) \frac{10 \cdot 1000}{10 \cdot 1000} \quad (8)$$

Nyní vhodněji vyjádřím rovnici (8), protože v mé práci budu znát mnou zvolené zesílení a tak budu potřebovat vypočítat hodnotu odporu R_G :

$$R_G = \frac{49,8 \cdot 10^3}{A - 1} \quad (9)$$

Původně zvolenou hodnotu zesílení bude nutné upravit, protože zesílení 175 se ukázalo jako příliš vysoké. Jelikož sčítačka byla na nepájivém poli symetricky napájena ± 5 V a sama měla nějaký úbytek napětí, mohla mít na výstupu maximální napětí 3,5 V. Z důvodu použití napěťové reference 2,5 V pro posunutí rozsahu do kladných hodnot tak mohlo výstupní napětí z přístrojového zesilovače dosáhnout hodnoty maximálně 1 V. Proto bude nyní nutné omezit se na teplotní rozsah od -10 $^{\circ}$ C do 70 $^{\circ}$ C, čemuž odpovídá

napětí -4,5 mV až 8 mV. Je tedy vidět, že maximální vstupní hodnota do přístrojového zesilovače bude 8 mV a protože maximální výstupní hodnota na přístrojovém zesilovači může být 1 V, je tedy nutné nastavit zesílení do hodnoty 125. Pro snadnější ladění a ověřování správné funkčnosti zesílení AD620 zvolím hodnotu zesílení 100. Dosazením této hodnoty do rovnice (9) dostávám hodnotu řídicího rezistoru R_G :

$$R_G = \frac{49,8 \cdot 10^3}{A - 1} = \frac{49,8 \cdot 10^3}{100 - 1} \cong 500 \Omega \quad (10)$$

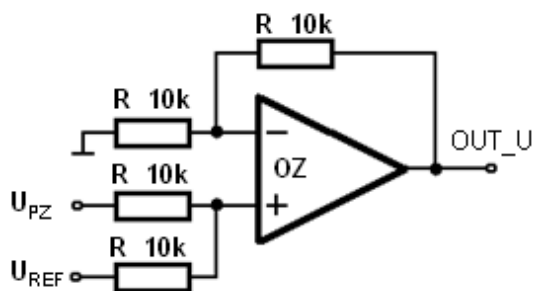
Výsledkem je tedy navržení přístrojového zesilovače pomocí integrovaného obvodu AD620 s řídicím rezistorem $R_G = 500 \Omega$, čemuž odpovídá zesílení 100. Tímto návrhem jsem zároveň omezil celý senzor na teplotní rozsah od -10 °C do 70 °C. Ve finálním obvodu použiji místo pevného rezistoru $R_G = 500 \Omega$ rezistorový trimmer o hodnotě větší než 500 Ω , tedy například 2,5 k Ω , pro přesné naladění zesílení na hodnotu 100.

3.1.2 Návrh sčítačky

Pro posunutí zesíleného rozsahu do kladných hodnot použiji sčítačku. I v tomto případě vytvořím sčítačku pomocí operačního zesilovače. Pro mou potřebu bude stačit základní zapojení neinvertující sčítačky dle obrázku (Obrázek 10). Výstupní napětí takovéto sčítačky při rovnosti všech rezistorů je potom:

$$U_{out} = (U_1 + U_2 + \dots + U_n) \quad (11)$$

V mém případě budu sčítat dvě napětí a to výstupní napětí z přístrojového zesilovače s referenčním napětím, které si později vytvořím pomocí napěťové reference s hodnotou 2,5 V. Do sčítačky budu tedy přivádět dvě hodnoty napětí. První hodnota bude v rozsahu cca od -0,5 V do 1 V, druhá hodnota bude pevně na 2,5 V. Výsledkem je součet těchto dvou napětí. Pomocí vhodně zvolené napěťové reference se na výstupu budu pohybovat pouze v kladných hodnotách. Hodnoty všech rezistorů ve sčítačce musí být shodné. Já je zvolím dle běžně používaných hodnot, tedy $R = 10 \text{ k}\Omega$.



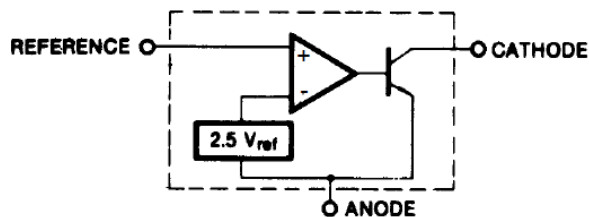
Obrázek 24 - Schéma zapojení neinvertující sčítačky

Na obrázku (Obrázek 24) je potom výsledné schéma navržené sčítačky, kde na vstup U_{PZ} přivedu výstupní napětí z přístrojového zesilovače a na vstup U_{REF} přivedu napětí z reference o hodnotě 2,5 V. Výsledně upravené napětí z termočlávkového výstupu senzoru potom je na výstupu OUT_U . Na tomto výstupu tedy bude napětí v rozsahu od cca 2 V do 3,5 V, čemuž odpovídá již výše zmíněný teplotní rozsah -10 °C až 70 °C.

3.1.3 Návrh napěťové reference

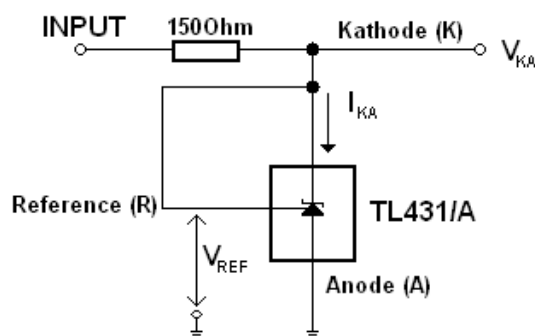
Napěťová reference bude zapotřebí kvůli posunu rozsahu z termočládku do kladných hodnot pro pozdější lepší práci s mikrokontrolérem, jak již bylo popsáno výše. Důležitým krokem, který je nutný si rozmyslet, bude hodnota napěťové reference. Jak jsem již dříve psal, použiji napěťovou referenci s hodnotou napětí 2,5 V. Tuto hodnotu jsem opět musel volit s ohledem na rozsah napětí, který je schopen zpracovat mikrokontrolér. A protože z přístrojového zesilovače dostávám hodnoty -1 V až 2 V resp. -2 V až 1 V a mnou použitý mikrokontrolér bude pracovat s napětím maximálně do 5,5 V, bylo nutné zvolit právě takovou hodnotu referenčního napětí, abych rozsah z přístrojového zesilovače posunul do kladných hodnot a zároveň nepřekročil hodnotu 5,5 V pro mikrokontrolér (respektive 3,5 V pro sčítačku, která bude napájena symetrickým napětím o hodnotě ± 5 V). Proto jsem zvolil napěťovou referenci s hodnotou 2,5 V.

Pro můj účel jsem zvolil napěťovou referenci typu TL431. Jde o obvod, který je schopný dodat stabilní napětí od 2,5 V do 36 V při napájení od 2,5 V do 36 V. Obvod je nastavován dvěma externími rezistory. Protože ale mě bude stačit minimální napětí, která reference může vytvořit, nebylo nutné do obvodu externí rezistory zapojovat. Blokové schéma obvodu TL431 je vidět na obrázku (Obrázek 25).



Obrázek 25 - Zjednodušené vnitřní zapojení obvodu TL431 [5]

V zapojení dle obvodu na obrázku (Obrázek 26) se výstupní napětí $V_{KA} = V_{REF}$ a hodnota V_{REF} je přímo rovna hodnotě 2,5 V. Jde tedy o to, že obvod TL431 má v sobě referenci 2,5 V a pomocí externích rezistorů mohu tuto referenci zvyšovat. Pokud jsem ale chtěl na výstupu přímo tuto základní referenci tj. 2,5 V, propojil jsem u obvodu TL431 vývod R (reference) s vývodem K (katoda) a vývod A (anoda) jsem připojil na zem. Napájecí napětí jsem připojil, přes předřadný odpor na vývod K. Velikost předřadného odporu by dle výrobce, měla být kolem 150 Ω .



Obrázek 26 - Schéma zapojení napěťové reference TL431

3.2 Návrh vyhodnocení pro termistor

Jak jsem již popsal výše, protože jsem chtěl použít zdroj proudu s teplotní kompenzací, bylo nutné sestavit zdroj proudu pomocí dvou řídicích rezistorů s jednou diodou dle obrázku (Obrázek 12). Výrobce doporučená dioda je 1N457 s teplotním koeficientem $-2,5 \text{ mV}/^\circ\text{C}$. Já jsem ovšem použil lépe dostupnější diodu 1N4007 s teplotním koeficientem $-2 \text{ mV}/^\circ\text{C}$. Bylo tedy nutné přepočítat výrobcem doporučený poměr mezi dvěma rezistory, který při použití diody 1N457 byl $R_2 = 10 \cdot R_1$. Vztah pro výpočet poměru řídicích rezistorů pro diodu 1N4007 je:

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{2 \text{ mV}/^\circ\text{C} - 227 \text{ }\mu\text{V}/^\circ\text{C}}{227 \text{ }\mu\text{V}/^\circ\text{C}} = 7,7 \quad (12)$$

Je tedy potřeba použít takové hodnoty rezistorů, aby jejich poměr byl roven hodnotě 7,7. Zároveň jsem hodnoty rezistorů musel zvolit tak, abych dostal ze zdroje proudu požadovaný proud 10 μA , jehož hodnotu jsem si určil v teoretickém rozboru. Vztah pro I_{SET} je:

$$I_{SET} = \left(\frac{V_R}{R_1}\right) + \left(\frac{V_R + V_D}{R_2}\right) \quad (13)$$

kde hodnota V_R je výrobcem udávána jako 67,7 mV, napětí na diodě je $V_D = 0,6 \text{ V}$ a rezistor $R_2 = 7,7 \cdot R_1$. V rovnici (13) znám tedy všechny hodnoty, kromě hodnoty rezistoru R_1 . Pomocí nástroje „analýza hypotéz“ v programu „Microsoft Office Excel“ jsem vypočetl hodnotu rezistoru R_1 a následně i hodnotu rezistoru R_2 , jak je vidět v tabulce (Tabulka 3) ve žlutém zbarvení.

Vypočtené hodnoty							
Iset (uA)	Vr (V)	Vd (V)	R1 (Ω)	R2 = 7,8 · R1 (Ω)	R1 (k Ω)	R2 (k Ω)	poměr odporů
10	0,06	0,60	14913	116323	14,9	116,3	7,8

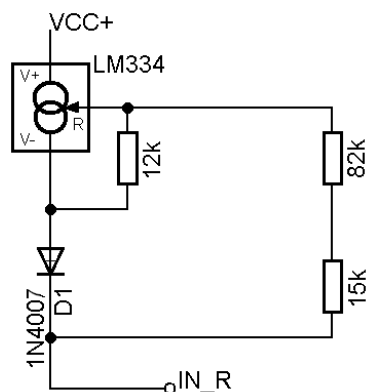
Tabulka 3 - Přehled vypočtených hodnot rezistorů pro $I_{SET}=10 \mu\text{A}$

Protože se jednalo pouze o hodnoty vypočtené, ale ve skutečnosti takto zvolené hodnoty nevykazovaly proud o hodnotě 10 μA , bylo nutné reálné hodnoty doladit postupným měněním hodnot odporů v rozumných krocích do doby, než vycházela mnou požadovaná hodnota proudu. Vypočtené hodnoty rezistorů mi tedy sloužily jen jako jakýsi výchozí bod pro přesné doladění výsledných hodnot. Skutečné použité hodnoty rezistorů potom byly dle tabulky (Tabulka 4):

Možné hodnoty, dle dostupných součástek								
Iset	Vr (V)	Vd (V)	R1 (Ω)	R2 (Ω)	R1 (k Ω)	R2 (k Ω)	poměr odporů	I_{skut}
12,18	0,06	0,60	12000	97000	12	97	8,1	10

Tabulka 4 - Přehled skutečných hodnot rezistorů pro $I_{SET}=10 \mu\text{A}$

Vzhledem k omezeným hodnotám rezistorů jsem rezistor R_2 složil ze dvou rezistorů o hodnotách 82 k Ω a 15 k Ω . Výsledné zapojení navrženého zdroje proudu je potom vidět na obrázku (Obrázek 27).



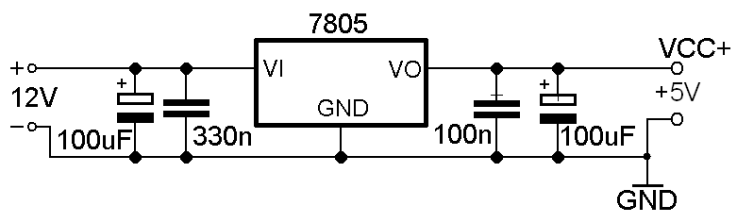
Obrázek 27 - Schéma zapojení zdroje proudu

Výsledkem je tedy zdroj proudu dodávající proud $10 \mu\text{A}$ s teplotní kompenzací zajištěnou diodou 1N4007 s poklesem napětí $-2 \text{ mV}/^\circ\text{C}$. Napájení zdroje proudu bude zajištěno kladnou částí symetrického zdroje s hodnotou 5 V. Svorka IN_R se potom zapojí na termistorový výstup senzoru. Napětí se bude měřit vůči zemi.

3.3 Návrh symetrického zdroje napětí

Celý obvod budu napájet adaptérem s výstupním napětím 12 V a proudem 1 A. Nejprve vyvedu 12 V přímo na integrovaný obvod L7805, který napětí stabilizuje na 5 V. Zároveň 12 V přivedu na vhodně zapojený integrovaný obvod NE555, který z 12 V vytvoří záporné napětí -12 V. Poté je napětí -12 V stabilizováno pomocí integrovaného obvodu L79L05 na -5 V. V pozdějším návrhu bude ještě nutné použití kladného stabilizátoru přizpůsobit proudovému odběru servomotorů, který bude kolem 750 mA. Zapojení se ovšem bude lišit pouze v typu integrovaného obvodu, tudíž vývody zůstanou stejné.

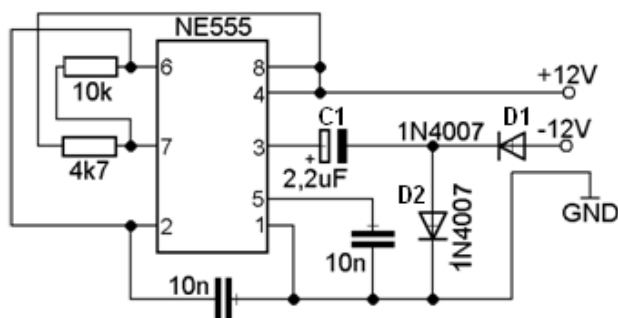
Zapojení kladného stabilizátoru je vidět na obrázku (Obrázek 28). Výrobce doporučuje keramické kondenzátory na vstupu s hodnotou 330 nF i výstupu s hodnotou 100 nF stabilizátoru jsou ještě doplněny filtračními elektrolytickými kondenzátory taktéž na vstupu i výstupu s hodnotou $100 \mu\text{F}$. Do obvodu L7805 tedy vstupuje 12 V, na výstupu je potom stabilizovaných 5 V.



Obrázek 28 - Schéma zapojení kladného stabilizátoru napětí z 12 V na 5 V

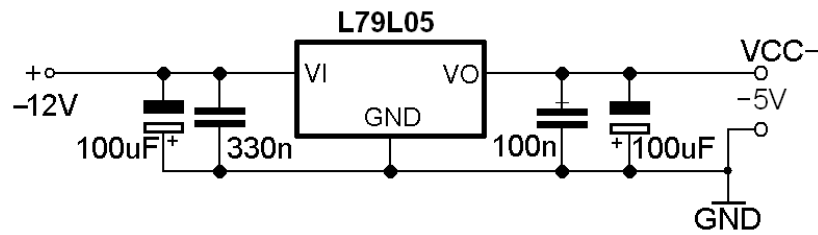
Kladná svorka z adaptéru o hodnotě 12 V je ještě paralelně vyvedena do obvodu NE555, který je zapojen jako zdroj záporného napětí.

Časovač 555 je monolitický integrovaný obvod, provedený bipolární technikou. Jeho zapojení se skládá z napěťového děliče vytvářejícího referenční napětí pro vstupy komparátorů, ze dvou komparátorů, z paměťového klopného obvodu, z výkonového koncového stupně a ze spínacího tranzistoru. Komparátor je vlastně porovnávač napětí. Jakmile překročí vstupní napětí hodnotu porovnávacího napětí, změní výstup skokově svůj stav. Vstupy dvou operačních zesilovačů, zapojených jako komparátory jsou hlavními vstupy zapojení. Porovnávacími napětími jsou dvě referenční napětí získaná napěťovým děličem. Výstupy obou komparátorů jsou spojeny se vstupy klopného obvodu RS (reset-set), který má vyveden ještě jeden nulovací vstup. Výstup klopného obvodu tvoří hlavní výstup časovače 555. Schéma zapojení časovače 555 jako zdroje záporného napětí je vidět na obrázku (Obrázek 29). Na výstupu časovače (vývod 3) vzniká pravoúhlé napětí, které střídavě nabíjí kondenzátor C_1 přes diodu D_2 (z napájecího napětí U_B , je-li na výstupu právě napěťová úroveň H) a vybíjí přes diodu D_1 (je-li na výstupu napěťová úroveň L). Vybíjecí proud procházející diodou D_1 vytváří na svorce „-12 V“ záporné výstupní napětí -12 V. S hodnotami odporů, uvedenými v zapojení je vyráběno pomocné napětí -5 V z napájecího napětí 12 V. Odebírat lze proud až 60 mA [12].



Obrázek 29 - Schéma zapojení zdroje záporného napětí [12]

Svorku „-12 V“ nyní přivedu na stabilizátor L79L05, který stabilizuje záporná napětí na -5 V. Zapojení záporného stabilizátoru je vidět na obrázku (Obrázek 30). I zde jsou výrobcem doporučené keramické kondenzátory na vstupu s hodnotou 330 nF a výstupu s hodnotou 100 nF stabilizátoru ještě doplněny filtračními elektrolytickými kondenzátory taktéž na vstupu i výstupu s hodnotou 100 μ F. Do obvodu L79L05 tedy vstupuje -12 V, na výstupu je potom stabilizovaných -5 V.



Obrázek 30 - Schéma zapojení záporného stabilizátoru z -12 V na -5 V

4. Návrh digitální části

4.1 Návrh vyhodnocovací jednotky pro zobrazení jedné teploty

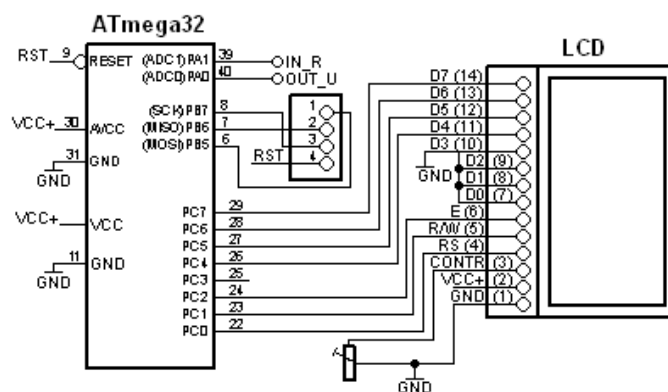
V této části práce jsem navrhnul vyhodnocovací jednotku pro snímání teploty objektu v jednom bodě. Smyslem této vyhodnocovací jednotky je následný test citlivosti senzoru, na jehož základě se později bude nastavovat krok servomotorů. Zároveň si v této části ověřím správnost návrhu analogové jednotky a tu pak přesně odladím.

4.1.1 Vyhodnocovací jednotka pro zobrazení jedné teploty

Při návrhu digitální části bylo nutné použití mikrokontroléru. Jak již bylo psáno v teoretickém rozboru, ve své práci jsem zvolil mikrokontrolér od firmy Atmel, konkrétně typ Atmega32. Protože zatím budu zobrazovat jen hodnotu jedné teploty, použiji jako zobrazovací jednotku dvouřádkový šestnáctiznakový alfanumerický displej. Hlavním úkolem v této části práce tedy bude zprovoznění AD převodníku, který mi analogové hodnoty dvou napětí ze senzoru (jedno napětí z termočlánku a druhé z termistoru) převede na digitální hodnoty a dále je přepočtem převede na odpovídající hodnotu teploty, která se zobrazí na displeji.

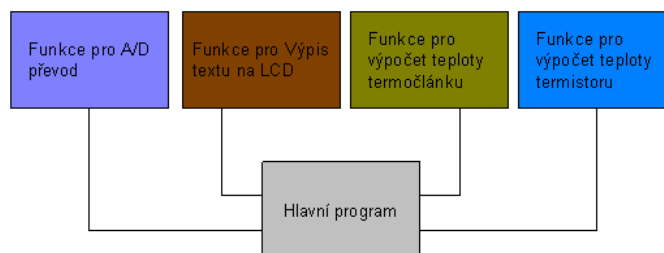
Mikrokontrolér ATmega32 obsahuje integrovaný 10 bitový AD převodník s postupnou aproximací. Lze využít až 8 vstupů. Pro určení reference lze použít tři hodnoty napětí. Na pinu AREF, AVCC nebo vnitřní referenci 2,56 V. Protože referenční napětí musí být větší než moje maximální napětí přivedené do AD převodníku, což může být až 3,5 V, zvolil jsem referenci na pinu AVCC. Tedy na tento pin přivedu napájecí napětí, které je v mém zapojení zhruba 5 V a zároveň mezi tento pin a analogovou zem zapojím filtrační kondenzátor 100 nF. Celý AD převodník se nastavuje pomocí dvou registrů ADMUX a ADCSRA. Do mikrokontroléru přivádím dvě hodnoty napětí a to na pin ADC0 (pin číslo 40), který mi bude zpracovávat napětí z termočlánku (tj. V0) a na pin ADC1 (pin číslo 39), který bude zpracovávat napětí z termistoru (tj. V1). Na porty „C“ bude připojen displej (tedy čísla pinů 22 až 29, pin 25 bude nezapojen). Pro zprovoznění reference na pinu AVCC přivedu na tento pin napájecí napětí (tj. pin 30 s napětím cca 5 V). Napájecí napětí přivedu také na pin 10.

Z tohoto pinu ještě zapojím vůči zemi filtrační kondenzátor 100 nF. Nakonec zapojím oba zemnicí piny mikrokontroléru. Piny 6 až 9, tedy: MOSI, MISO, SCK a RESET, budou sloužit pro programování. Při zapojování displeje jsem postupoval dle doporučených zapojení displeje [6]. Mezi piny CONTR (tj. pin číslo 3) a pin GND (tj. pin číslo 1) jsem zapojil potenciometr 5 k Ω pro pozdější doladění jasu displeje. Celé schéma zapojení je vidět na obrázku (Obrázek 31), kde na pin IN_R je přiveden analogově upravený výstup z termistorového vývodu senzoru a na pin OUT_U je přiveden analogově upravený výstup z termočláňkového vývodu senzoru. Obvod je napájen 5 V.



Obrázek 31 - Schéma zapojení digitální části

Hlavní části programu potřebné ke správné funkci mikrokontroléru jsou vidět na obrázku (Obrázek 32). Celý program běhá v nekonečné hlavní smyčce a v určitém okamžiku si volá potřebné 4 funkce: funkci pro výpis textu na displej, funkci pro AD převod, funkci pro výpočet teploty na termočláňku a funkci pro výpočet teploty na termistoru.

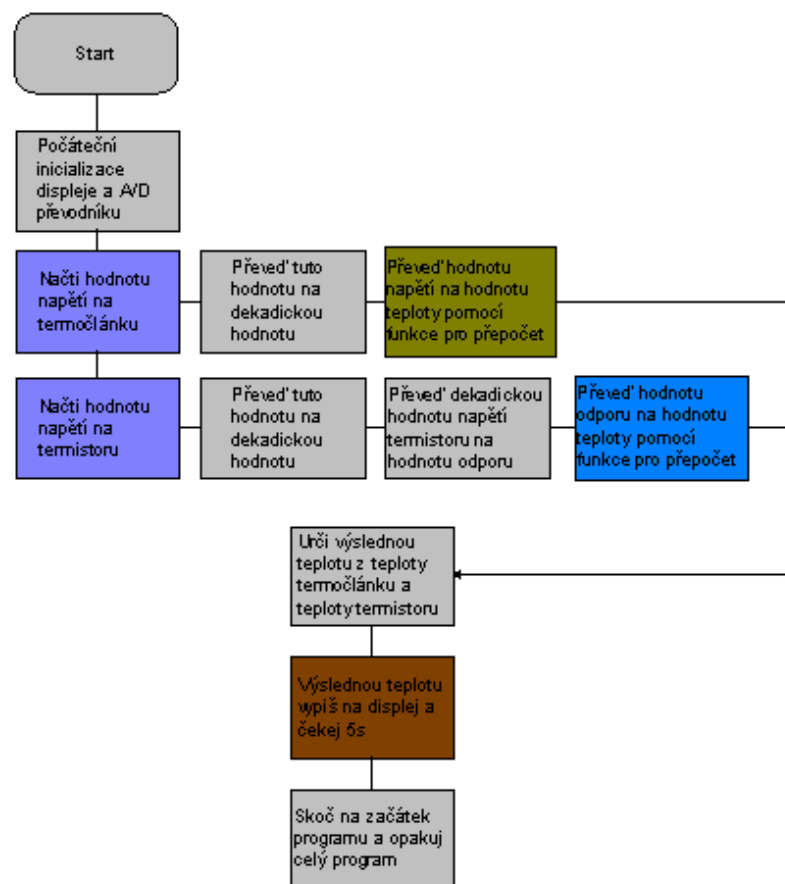


Obrázek 32 - Blokový diagram hlavních částí programu

- **Hlavní program**

Vnitřek nekonečné hlavní smyčky je naznačen pomocí vývojového diagramu na obrázku (Obrázek 33). Po zapnutí celého obvodu převede postupně AD převodník

analogové hodnoty ze senzoru na hodnoty digitální. Nejprve převede hodnotu napětí na termočlátku, poté převede hodnotu napětí na termistoru. Po převedení obou hodnot dojde k jejich převodu z binární na dekadickou hodnotu tak, že hodnoty vynásobí poměrem $5 \text{ V} / 1023$. Hodnota 1023 vychází z 10 bitové přesnosti převodníku a hodnota 5 V je maximální hodnota napětí na mikrokontroléru. Tímto poměrem získám hodnotu napětí jednoho bitu. Po vynásobení binární hodnoty napětí tímto poměrem tedy dostanu dekadickou hodnotu napětí. Hodnota napětí na termočlátku je následně pomocí funkce převedena na hodnotu teploty termočlátku. Hodnota napětí na termistoru je nejprve díky známému proudu a napětí na termistoru převedena na hodnotu odporu. Poté je tato hodnota odporu pomocí funkce převedena na hodnotu teploty na termistoru. Obě výsledné teploty (teplota termočlátku a teplota termistoru) jsou následně přepočteny na jednu výslednou teplotu. Tato výsledná teplota je zobrazena na displeji po dobu 5 s. Poté skočí program na začátek smyčky a spustí nové snímání teploty na senzoru a následně opakuje celý převod nasnímaných dvou hodnot napětí na jednu hodnotu teploty. Toto se cyklově opakuje do nekonečně, nebo do vypnutí obvodu.



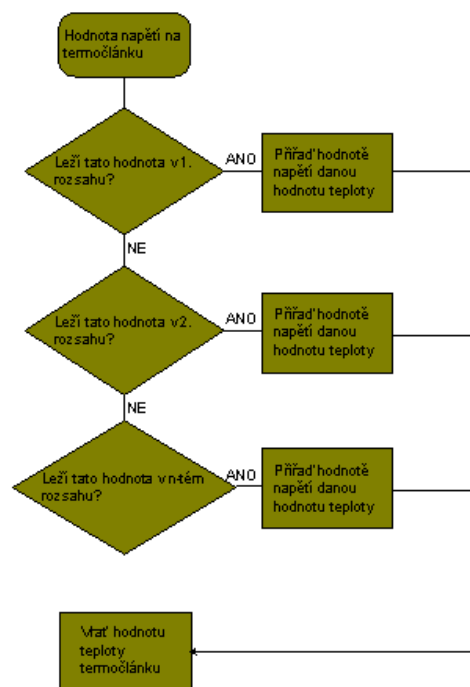
Obrázek 33 - Vývojový diagram hlavní smyčky programu

- **Funkce pro výpočet teploty termočlánu**

Vývojový diagram celé této funkce je vidět na obrázku (Obrázek 34). Základem této funkce je osm podmínek, které program postupně projede pomocí cyklu. Každá podmínka obsahuje jakýsi teplotní základ a napěťový základ. Tímto si udělám linearizaci křivky po úsecích pro lepší přepočítání. Tyto hodnoty napěťového základu jsou určeny pomocí datasheetu od výrobce senzoru.

Dále pomocí tolerance napěťového základu jsou určeny napěťové rozsahy kolem každého napěťového základu. Hodnota tolerance je dle výrobce $\pm 1\%$.

Mezi jednotlivými rozsahy již uvažuji lineární růst (či pokles) a tak cyklově postupně přičítám k jednotlivým základům lineárně určitou hodnotu kroku a postupně projedu všechny možné hodnoty napětí na termočlánu a hledám takovou hodnotu napětí, která se rovná hodnotě napětí naměřenou na termočlánu.



Obrázek 34 - Vývojový diagram funkce pro převod napětí termočlánu na hodnotu teploty

- **Funkce pro výpočet teploty termistoru (pouzdra)**

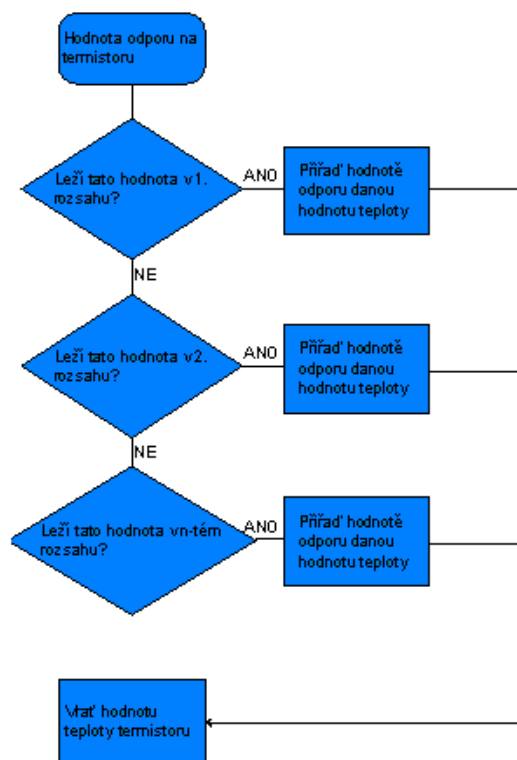
Teplotní rozsah okolí, ve kterém bude schopen senzor měřit, je nastaven v rozsahu od 0 °C do 40 °C. Hodnota tohoto rozsahu byla určena s ohledem na maximální možné napětí, které lze dostat na termistorovém vývodu díky zdroji proudu a vzniklém odporu a to je maximálně 3,5 V (jak již bylo psáno výše s ohledem na napájecí

napětí 5 V a úbytku 1,5 V na zdroji proudu). Tomuto maximálnímu napětí téměř odpovídá hodnota 0 °C, čímž vznikla spodní hranice teploty okolí. Pro nižší hodnoty teploty okolí by rostla hodnota napětí nad hodnotu 3,5 V a obvod by tak tyto hodnoty již nevytvořil. Horní hranice 40 °C byla určena s ohledem na běžné klimatické podmínky.

Vývojový diagram celé této funkce je vidět na obrázku (Obrázek 35). Také zde je základem osm podmínek, které program postupně projede pomocí cyklu. Každá podmínka ale obsahuje odporový základ a napěťový základ. Tímto si opět udělám linearizaci křivky po úsecích pro lepší přepoččet. Tyto hodnoty odporového základu jsou určeny pomocí datasheetu od výrobce senzoru.

Dále pomocí tolerance odporového základu jsou určeny odporové rozsahy kolem každého odporového základu. Hodnota tolerance je dle výrobce $\pm 3 \%$.

Mezi jednotlivými rozsahy již uvažuji lineární růst (či pokles) a tak cyklově postupně přičítám k jednotlivým základům lineárně určitou hodnotu kroku a postupně projedu všechny možné hodnoty odporů na termistoru a hledám takovou hodnotu odporu, která se rovná hodnotě odporu naměřené na termistoru.



Obrázek 35 - Vývojový diagram funkce pro převod odporu termistoru na hodnotu teploty

- **Funkce pro AD převod**

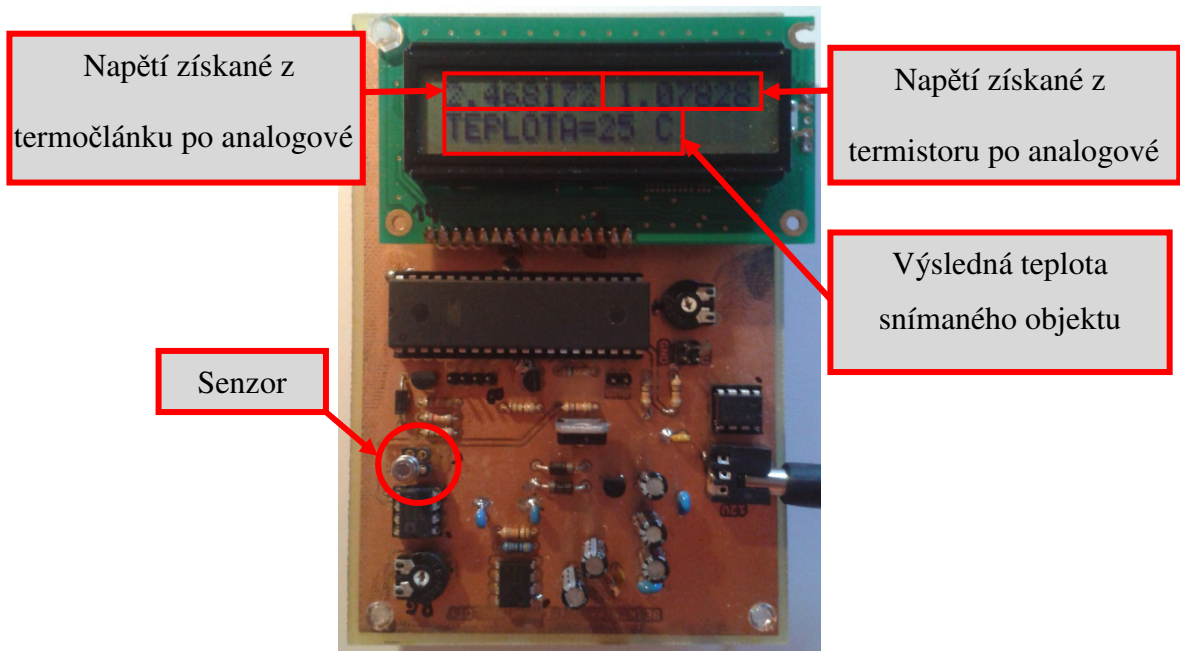
V této funkci je důležité nastavení registrů ADMUX a ADCSRA. Registrem ADMUX nastavuji referenci na hodnotu AVCC a volím kanál, na kterém budu číst převáděnou hodnotu (tj. kanál 1 pro čtení hodnoty z termočlánu a kanál 2 pro čtení hodnoty z termistoru). Registrem ADCSRA spustím převod aktivací bitu ADSC a zároveň s ním hlídám dobu převodu. Po ukončení převodu registrem ADCSRA převod vypnu bitem ADSC. Výsledná hodnota je potom v registru ADCW.

- **Funkce pro výpis na LCD**

Ve funkci pro výpis textu nebo proměnné na LCD displej je důležité programově počátečně vyčistit displej a následně nadefinovat pozici textu a text nebo proměnnou, kterou chci vypsát na displej.

4.1.2 Ověření funkčnosti zobrazení jedné teploty

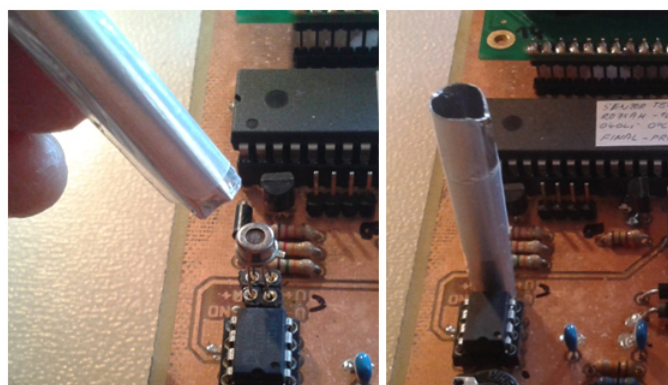
Po sestavení programu jsem pomocí návrhového softwaru pro DPS navrhnul desku plošných spojů. Navržená a osazená DPS je potom vidět na obrázku (Obrázek 36). Při ožívání DPS bylo nutné pomocí trimru pro jas displeje nastavit takovou hodnotu odporu, aby měl displej viditelný obraz a zároveň trimrem u přístrojového zesilovače doladit takovou hodnotu R_G , aby při teplotě 25 °C, byla na displeji hodnota napětí odpovídající napěťové referenci 2,5 V. Tím jsem nastavil zesílení přístrojového zesilovače přesně na hodnotu 100. Hodnota zobrazená na displeji odpovídá teplotě snímané místnosti. Výsledkem je plně funkční bezkontaktní teploměr s teplotním rozsahem měřeného objektu -10 °C až 70 °C a teplotním rozsahem okolí v měřené oblasti od 0 °C do 40 °C.



Obrázek 36 - Jednobodový bezkontaktní senzor teploty

4.1.3 Testování detekce senzoru s vymežovací trubičkou

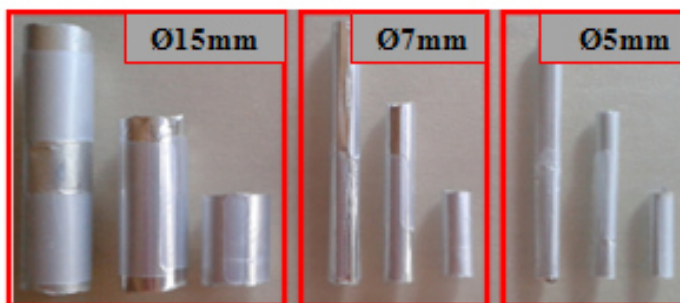
Vzhledem k tomu, že bude potřeba omezit detekční úhel na určitý stupeň a podle toho později nastavit polohování servomotorů, bylo nutné detekční úhel nějak omezit. K tomuto omezení jsem použil hliníkové trubičky o různých délkách a průměrech, které jsem postupně nasadil na senzor (Obrázek 37). Emisivita hliníku je nízká (většinou do hodnoty 0,1), což způsobuje téměř dokonalý odraz tepla a tak dojde postupnými odrazy v trubičce k lepšímu přenosu tepla až na senzor.



Obrázek 37 - Nasazení hliníkové trubičky na senzor

Následně jsem pomocí testu, kde jsem snímal předmět s teplotou 40 °C při okolní teplotě 25 °C, zkoumal jaká trubička má nejlepší detekční vzdálenost a zároveň omezí detekční úhel na mnou zvolenou hodnotu 10°. Byly zvoleny tři délky a tři

průměry trubiček. Hodnoty délek byly 20 mm, 40 mm a 60 mm při průměrech 5 mm, 7 mm a 15 mm. Všechny trubičky jsou vidět na obrázku (Obrázek 38).



Obrázek 38 - Testované trubičky

Testem bylo zjištěno, že největší detekční vzdálenost bude mít trubička o průměru 7 mm s délkou 40 mm. Zároveň byl detekční úhel omezen zhruba na 10° . Výsledky detekčních vzdáleností všech trubiček jsou vidět v tabulce (Tabulka 5).

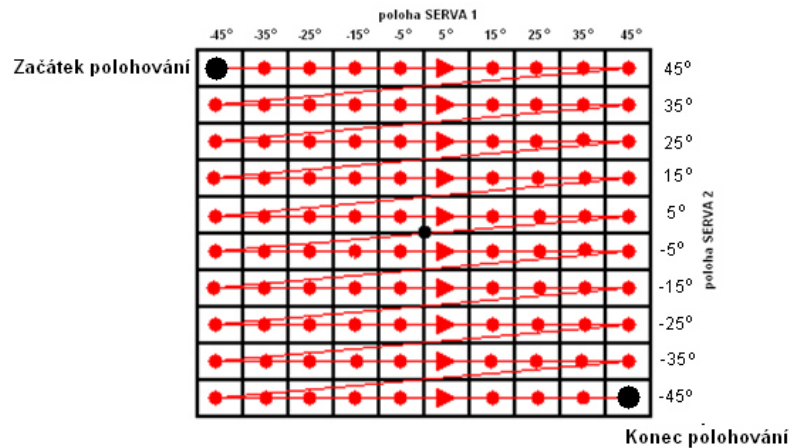
průměr (mm)	délka (mm)	detekce (mm)
5	20	150
	40	150
	60	150
7	20	150
	40	200
	60	200
15	20	150
	40	150
	60	150

Tabulka 5 - Výsledky testovaných trubiček

4.2 Návrh řídicí jednotky servomotorů

Pomocí hliníkové trubičky jsem si omezil detekční úhel na zhruba 10° . V této části budu navrhovat řídicí jednotku servomotorů, kde pohyb servomotorů bude právě po 10° kroku. Zároveň budu polohovat oba servomotory v detekčním úhlu 90° . Polohování bude probíhat od -45° do 45° pro SERVO 1 a od 45° do -45° pro SERVO 2. Servomotory takto proskenují čtvercový prostor. Skenování začne v levém horním rohu (tj. poloha -45° pro SERVO 1 a 45° pro SERVO 2) a bude pokračovat pohybem SERVO 1 vpravo po 10° kroku. Po dojetí nakonec prvního skenovaného

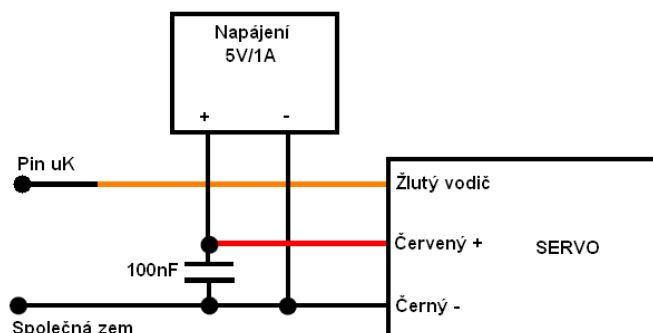
řádku (tj. do 45°) se pohne SERVO 2 o 10° dolů a zároveň se SERVO 1 posune zpět do polohy -45° . Takto se postupně projede všech 100 poloh tak, jak je naznačeno na obrázku (Obrázek 39).



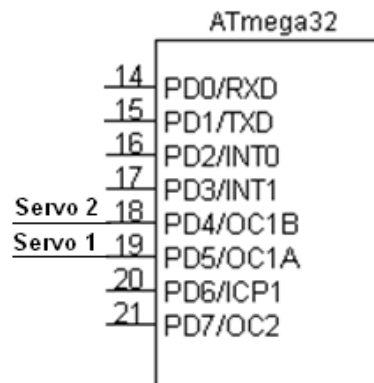
Obrázek 39 - Ukázka polohování servomotorů

4.2.1 Napájecí obvod servomotorů

Protože každý servomotor má při běhu proudový odběr kolem 150 mA, tedy celkem 300 mA, bude nutné použití stabilizátoru pro vyšší proudový odběr. Zároveň, jak již bylo popsáno v teoretické části práce, potřebují servomotory pro svou činnost napětí od 4,8 V do 6 V. Celkový proudový odběr obvodu bude kolem 450 mA a tak pro napájecí obvod použijí stabilizátor 5 V / 1 A. Z důvodu většího proudového odběru bude nutné ke stabilizátoru použít pasivní chladič, který zabrání přehřívání stabilizátoru. Každý servomotor má tři přívodní vodiče. Žlutý vodič (řídící), červený vodič (kladný napájecí vodič) a černý (záporný napájecí vodič, společná zem). Schéma zapojení přívodních vodičů je vidět na obrázku (Obrázek 40). Připojení řídicích vodičů k mikrokontroléru je potom vidět na obrázku (Obrázek 41).



Obrázek 40 - Schéma zapojení servomotorů k mikrokontroléru



Obrázek 41 - Připojení řídicích vodičů servomotorů k mikrokontroléru

4.2.2 Návrh řídicích hodnot pro generování PWM signálu

Pro generování PWM signálu využijí čítače/časovače1 v režimu „Fast PWM“. Celé řízení je nastaveno registry TCCR1A, TCCR1B, TCNT1, OCR1A a OCR1B. Registr TCCR1A nastaví generování PWM signálu v režimu „rychlý režim PWM“ s maximální hodnotou 3FFh. Registrem TCCR1B je nastavena frekvence čítače n (f_{clk}). Registrem TCNT1 je nastavena výchozí komparační hodnota. Registr OCR1A slouží k nastavení délky impulsu na kanálu 1 (tj. SERVO 1 = horizontální pohyb). Registrem OCR1B potom nastavují délku impulsu na kanálu 2 (tj. SERVO 2 = vertikální pohyb).

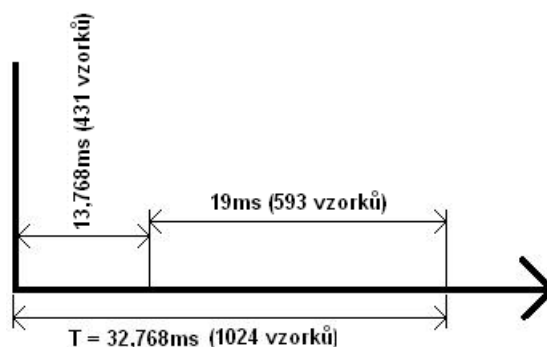
Frekvence mikrokontroléru je zvolena 2 MHz. Frekvence čítače1 je nastavena na hodnotu 31,25 kHz. Tuto hodnotu nastavím na registru TCCR1B. Protože počet vzorků v jedné periodě je 1024, bude výpočet hodnoty jedné periody následující:

$$T = \frac{n}{f_{clk}} = \frac{1024}{31250} = 32,768 \text{ ms} \quad (14)$$

Doba jednoho vzorku v periodě je potom:

$$T_{vz} = \frac{T}{n} = \frac{32,768 \cdot 10^{-3}}{1024} = 32 \mu s \quad (15)$$

Z rovnice (14) je vidět, že jedna perioda má hodnotu 32,768 ms. Pro správné řízení servomotorů, ale bude potřeba maximální perioda 20ms. Já zvolím periodu 19 ms. Z tohoto důvodu bylo nutné nastavit komparační úroveň pomocí registru TCNT1 na hodnotu 13,768. Potom bude perioda trvat právě 19 ms, protože původní perioda 32,768 ms bude o 13,768 ms zkrácena tak, jak je vidět na obrázku (Obrázek 42).



Obrázek 42 - Náčrt zkrácení periody na 20ms

Hodnotu 13,768 ms bylo nutné převést na hexadecimální hodnotu s poměrem 32 μ s na jeden vzorek. Tuto výchozí komparační hodnotu poté nastavím na registru TCNT1. Výpočet vypadal takto:

$$\frac{13,768 \cdot 10^{-3}}{32 \cdot 10^{-6}} = 431 = 1AFh \quad (16)$$

Při nastavování výchozích hodnot bylo i zde potřeba převést výchozí a krajní polohy (tj. 1 ms pro SERVO 1 a 1,5 ms pro SERVO 2) na hexadecimální hodnoty s poměrem 32 μ s na jeden vzorek a zároveň se k těmto hodnotám musí přičíst počáteční komparační úroveň z rovnice (16).

Při úvaze, že impulzy budou nastavovány od 1 ms do 2 ms, je rozsah impulzů 1 ms. Jednoduchým výpočtem jsem si zjistil dobu pro posun o 1 $^{\circ}$:

$$1^{\circ} \rightarrow \frac{\text{rozsah impulzů}}{\text{detekční úhel serv}} = \frac{1 \text{ ms}}{90^{\circ}} = 11,1 \mu\text{s} \quad (17)$$

Protože servomotory budou polohovány po 10 $^{\circ}$, je doba periody pro 10 $^{\circ}$ = 111 μ s. Opět i tuto hodnotu převedu na hexadecimální hodnotu s poměrem 32 μ s na jeden vzorek:

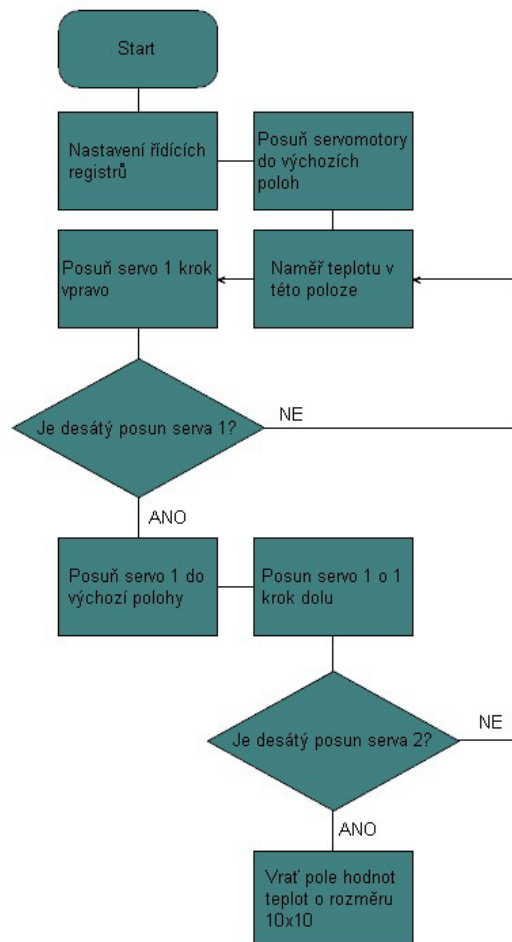
$$\frac{111 \cdot 10^{-6}}{32 \cdot 10^{-6}} \cong 3 = 3h \quad (18)$$

Tímto jsem si stanovil hodnotu kroku, který se postupně přičítá (pro SERVO 1) resp. odečítá (pro SERVO 2) k výchozím hodnotám nastavených na servomotorech dle obrázku (Obrázek 39). Výchozí hodnota pro SERVO 1 (horizontální pohyb) je 1ms tedy -45 $^{\circ}$, tomu odpovídá výchozí hodnota v hexadecimální tvaru 1CFh. Tuto hodnotu nastavím na registr OCR1A. Výchozí hodnota pro SERVO 2 (vertikální pohyb) je

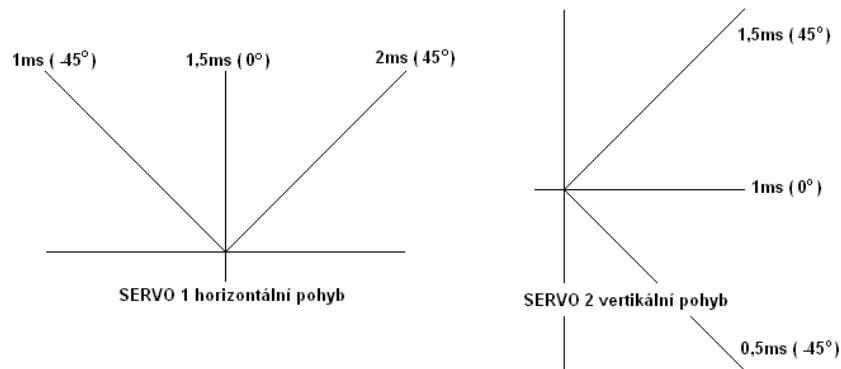
1,5 ms tedy 45° , tomu odpovídá výchozí hodnota v hexadecimální tvaru 1DDh. Tuto hodnotu nastavím na registru OCR1B. Krajiní polohy zjištěné pomocí osciloskopu jsou vidět na obrázku (Obrázek 44).

4.2.3 Program pro ovládání servomotorů

Celý program pro ovládání servomotorů je naznačen vývojovým diagramem, který je vidět na obrázku (Obrázek 43). Řízení servomotorů je nastaveno tak, že se nejprve obě serva nastaví do výchozích (krajních) poloh uvedených výše. Poté se k výchozí hodnotě pro SERVO 1 postupně $10\times$ přičte nastavený krok, kde po každém přičteném kroku k výchozí hodnotě serva, dojde k jeho posunu o 10° vpravo a k naměření hodnoty teploty snímaného předmětu v této poloze. Po proběhnutí všech 10 posunů se SERVO 1 vrátí do výchozí polohy a od výchozí hodnoty pro SERVO 2 se odečte nastavený krok, tedy posun dolů o 10° a celé posouvání se opakuje znovu do doby, než se SERVO 2 postupně posune $10\times$ dolů.



Obrázek 43 - Vývojový diagram programu pro ovládání servomotorů



Obrázek 44 - Krajní a středové polohy servomotorů

4.3 Návrh vyhodnocovací jednotky pro zobrazení matice teplot o rozměru 10×10

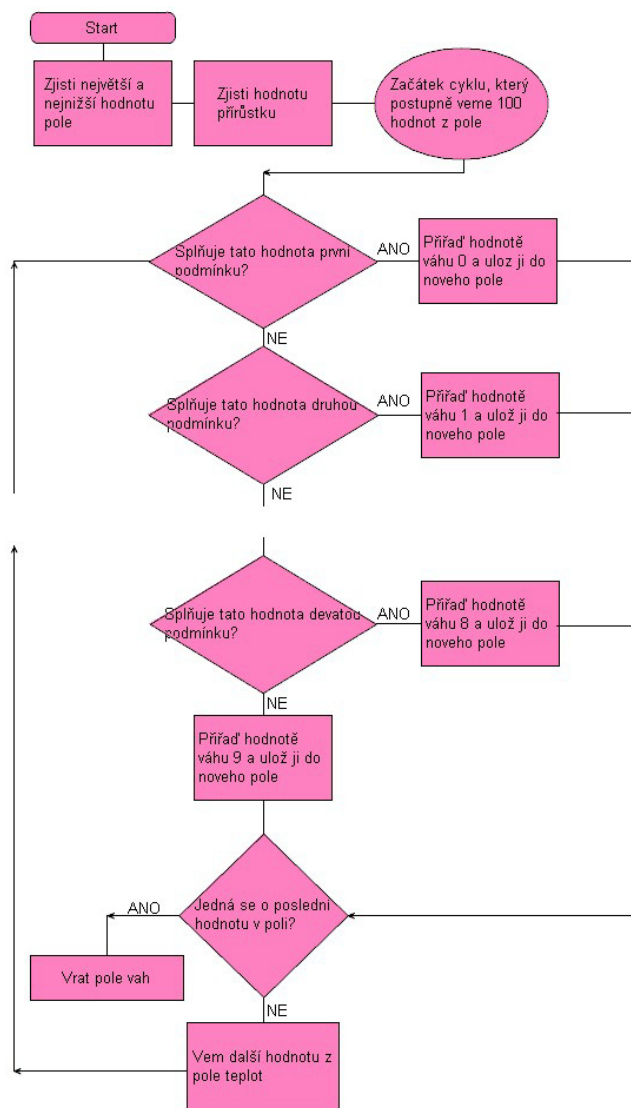
Po nasnímání matice hodnot teplot o rozměru 10×10, bude nutné tyto hodnoty přenést do osobního počítače pomocí USART komunikačního rozhraní a zde matici barevně zobrazit pomocí programu „Microsoft Office Excel“. Předtím se ale hodnoty teplot převedou na „váhy teplot“ pomocí čísel 0 až 9 dle hodnoty teploty. Na terminálu se tak budou zobrazovat dvě matice o rozměru 10×10. Jedna matice bude obsahovat hodnoty nasnímaných teplot, druhá matice bude obsahovat váhy teplot. Protože osobní počítač bude nejnázší propojit s mikrokontrolérem přes USB rozhraní, použiji převodník USART/USB.

4.3.1 Funkce pro převod hodnot teplot na váhy teplot

Převod hodnot teplot na váhy teplot je proveden následovně. Po načtení všech hodnot teploty do dvourozměrného pole se nalezne nejvyšší a nejnižší hodnota teploty v poli. Poté se zjistí rozsah těchto krajních hodnot jejich vzájemným odečtením. Tento rozsah se vydělí počtem vah, který bude v mém programu nastaven na hodnotu 10 (tj. 0 až 9) a tím je získán přírůstek teploty s každou váhou. Tedy například pro váhu teploty 5 bude tento přírůstek k nejnižší hodnotě teploty přičten 5krát a právě ta hodnota teploty, která se bude této hodnotě rovnat, dostane váhu 5.

V programu se postupně jednotlivé teploty v poli začnou porovnávat s deseti podmínkami, kde při splnění první podmínky se porovnávané teplotě přiřadí váha 0, při splnění druhé podmínky se přiřadí porovnávané teplotě váha 1 a takto se program dostane v případě stálé nerovnosti až do desáté podmínky, kde se dané teplotě přiřadí váha 9.

Vývojový diagram celé této funkce je vidět na obrázku (Obrázek 45). V první podmínce se daná teplota porovnává s nejnižší hodnotou teploty v poli sečtenou s přírůstkem. Pokud je tato teplota nižší než nejnižší hodnota sečtená s přírůstkem, přiřadí se jí váha 0. Ve druhé podmínce se daná teplota porovnává s intervalem od nejnižší hodnoty teploty sečtené s přírůstkem do nejnižší hodnoty teploty sečtenou s dvojnásobkem přírůstku. V případě, že porovnávaná hodnota teploty leží v tomto intervalu, přiřadí se této hodnotě teploty váha 1. Ve třetí podmínce se hodnota teploty porovnává s intervalem od nejnižší hodnoty teploty sečtené s dvojnásobkem přírůstku do nejnižší hodnoty teploty sečtenou s trojnásobkem přírůstku. Leží-li porovnávaná hodnota teploty v tomto intervalu, přiřadí se jí váha 2. Takto se postupně projede všech 10 podmínek s postupným růstem intervalu o vyšší násobek přírůstku.



Obrázek 45 - Vývojový diagram funkce pro převod pole teplot na váhy teplot

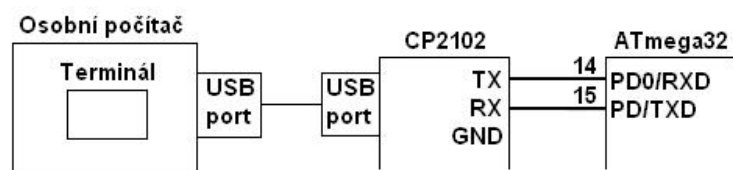
4.3.2 Nastavení USART komunikace

Řízení USART komunikace v mikrokontroléru ATmega32 spočívá ve správném nastavení řídicích registrů UCSRA, UCSRB, USRCR a UBRR. Moje komunikace je pomocí 8 bitových dat s jedním stop bitem a bez parity při asynchronním přenosu dat. Rychlost přenosu je nastavena na standardní rychlost 9600 baudů. Zároveň je mikrokontrolér nastaven pouze jako vysílač, který posílá data do osobního počítače. Není tedy potřeba nastavovat mikrokontrolér pro příjem dat. Z tohoto důvodu je pro správné nastavení USART komunikace potřeba pouze tří registrů a to UCSRB, kterým se nastaví režim vysílání, dále registr UCSRC, kterým se nastaví 8 bitový datový přenos s jedním stop bitem bez parity při asynchronním přenosu a nakonec registr UBRR, kterým se nastaví přenosová rychlost na 9600 baudů.



Obrázek 46 - Převodník USART/USB CP2102

Jako USART/USB převodník jsem ve své práci použil komerčně vyrobený kit CP2102 od firmy Silicon Laboratories, který je vidět na obrázku (Obrázek 46). Schéma zapojení celé vyhodnocovací jednotky je vidět na obrázku (Obrázek 47). Jako terminál jsem použil běžně dostupný terminál pro operační systém Windows XP „Hercules“ verze 3-2-8.

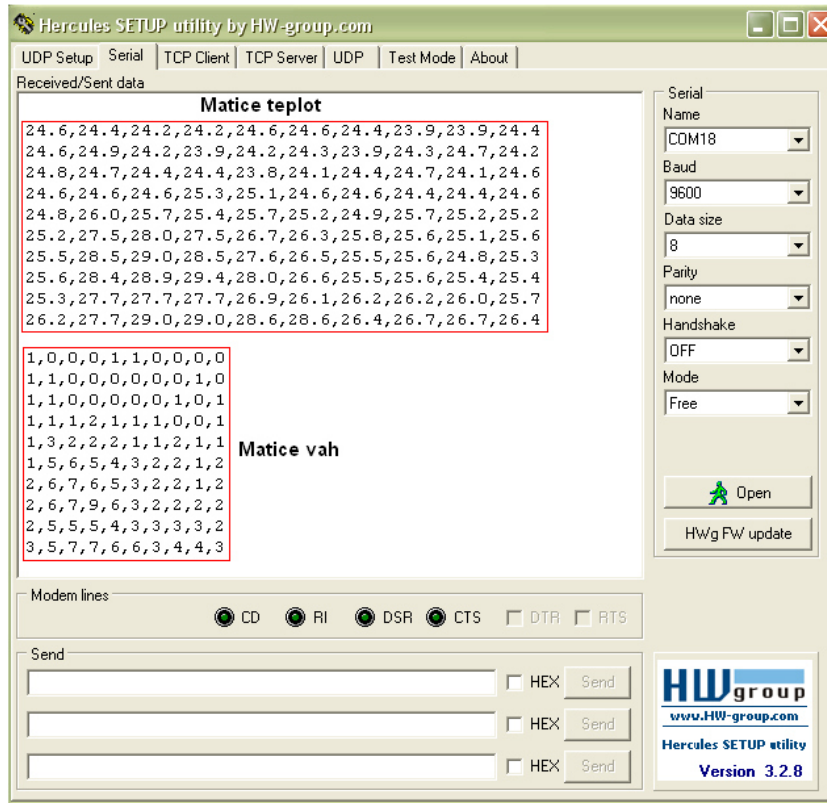


Obrázek 47 - Schéma zapojení vyhodnocovací jednotky pro zobrazení matice teplot o rozměru 10×10

4.3.3 Zobrazení obrazce nasnímaného předmětu pomocí terminálu

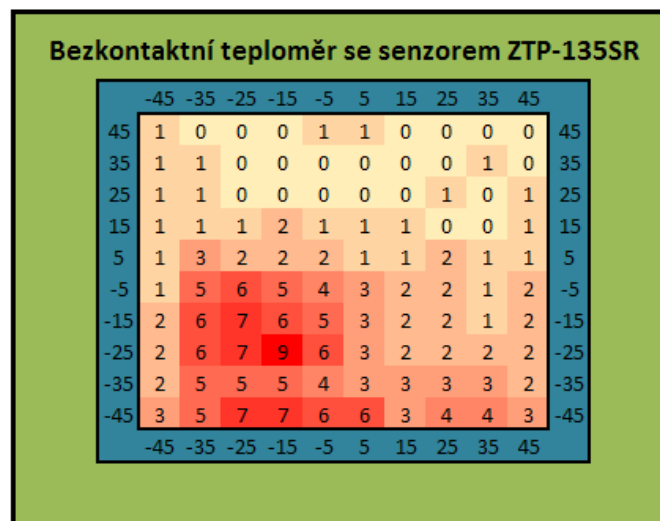
V terminálu se v hlavním menu klikne na záložku „Serial“, kde se postupně nastavuje USB port na kterém je USART připojen, poté se nastavuje přenosová rychlost na 9600 baudů. Dále je nutné nastavit velikost přenášených dat na 8 a zakázat parity. Po tomto nastavení se klikne na záložku „Open“ a terminál je připraven přijímat data z mikrokontroléru. Ve chvíli, kdy mikrokontrolér zahájí vysílání dat, začne terminál

postupně načítat nasnímanou matici teplot a poté matici vah tak, jak je vidět na obrázku (Obrázek 48).



Obrázek 48 - Hlavní okno terminálu s načtenými maticemi

Po načtení obou matic na terminál se matice vah přenesou do programu Microsoft Office Excel, kde se pomocí podmíněného formátování váhy barevně vykreslí v závislosti na hodnotě váhy tak, jak je vidět na obrázku (Obrázek 49).

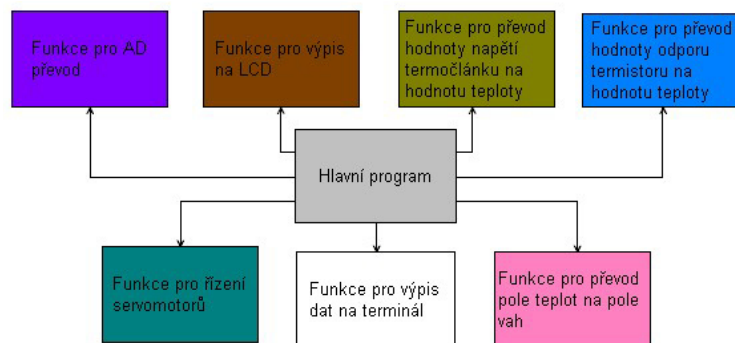


Obrázek 49 - Obraz nasnímaného předmětu plošným senzorem

5. Sestavení finálního programu a elektronického obvodu celého senzoru

5.1 Sestavení finálního programu blokově

Po tom co jsem si postupně sestavil jednotlivé části programu pro řízení senzoru teploty, jsem tyto části sloučil do hlavního programu celého senzoru. Blokové schéma finálního programu je vidět na obrázku (Obrázek 50). Finální program je řízen „Hlavním programem“. Má k dispozici sedm funkcí: „Funkce pro AD převod“, „Funkce pro výpis na LCD“, „Funkce pro převod hodnoty napětí na termočlánek na hodnotu teploty“, „Funkce pro převod hodnoty odporu termistoru na hodnotu teploty“, „Funkce pro řízení servomotorů“, „Funkce pro výpis dat na terminál“ a „Funkce pro převod pole teplot na pole vah“. Tyto funkce jsou „Hlavním programem“ postupně volány tak, aby byl senzor správně řízen.

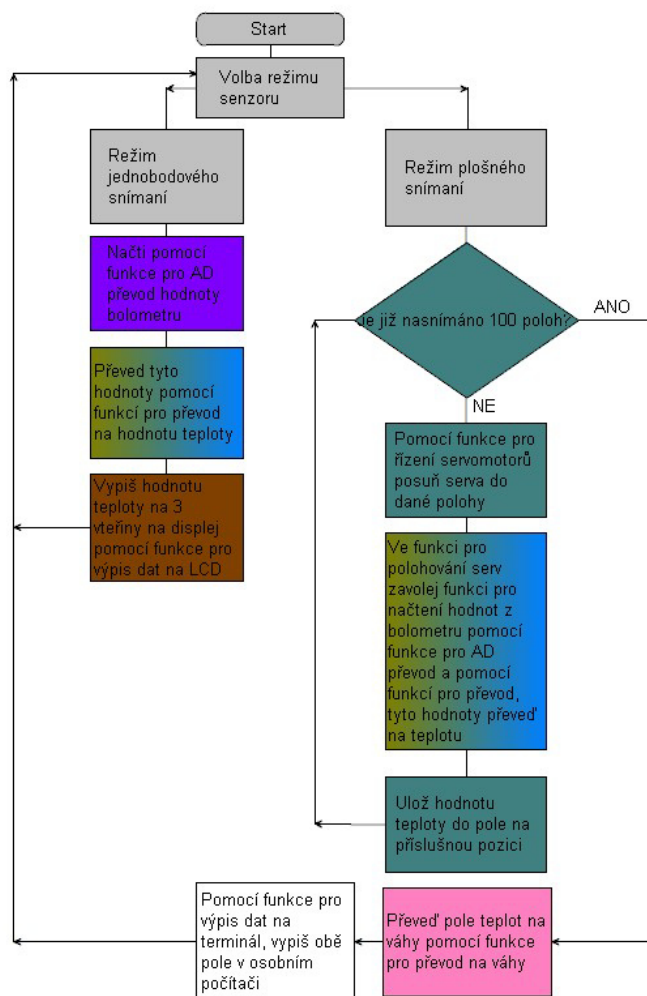


Obrázek 50 - Blokové schéma finálního programu

5.2 Popis funkce finálního programu

Vývojový diagram celého programu je vidět na obrázku (Obrázek 51). Celý senzor pracuje ve dvou režimech (režim 1 a režim 2). Režim 1 je jednobodové snímání teploty předmětu, režim 2 je plošné snímání teploty předmětu. Při zvolení režimu 1 se pomocí funkce pro AD převod 3000× nasnímají hodnoty napětí na termočlánek a na termistoru. Následně se pomocí funkcí pro převod na teploty tyto hodnoty převedou na 3000 teplot. Dále se z těchto hodnot vezme průměrná hodnota a ta se na dobu 3 s zobrazí na displeji. Poté se program vrátí na začátek a čeká na další výběr režimu. Při zvolení režimu 2 se servomotory pomocí funkce pro ovládání servomotorů natočí do

výchozích hodnot pro plošné snímání (tj. horní levý roh snímané oblasti). Následně se pomocí funkce pro AD převod 128× nasnímají hodnoty napětí na termočlánek a na termistoru. Poté se pomocí funkcí pro převod na teploty tyto hodnoty převedou na 128 teplot. Dále se z těchto hodnot vezme průměrná hodnota a uloží se do dvourozměrného pole o rozměru 10×10 na pozici 0×0. Nyní se SERVO 1 (horizontální pohyb) posune o 10 ° vpravo a opakuje se převod 128 hodnot na jednu teplotu, která se uloží do pole na pozici 1×0. Dále se serva řízeně posouvají dle obrázku (Obrázek 39) a nasnímají tak postupně 100 hodnot teploty, které se uloží do pole. Poté se tyto hodnoty v poli, pomocí funkce pro převod teplot na váhy, převedou na váhy teplot a uloží se do nového dvourozměrného pole taktéž o rozměru 10×10. Následně se program vrátí na začátek a čeká na další volbu režimu. Pro výpis hodnot polí na terminálu pomocí USART komunikace, je nutno po nasnímání všech 100 hodnot stisknout tlačítko pro výpis dat na terminál.

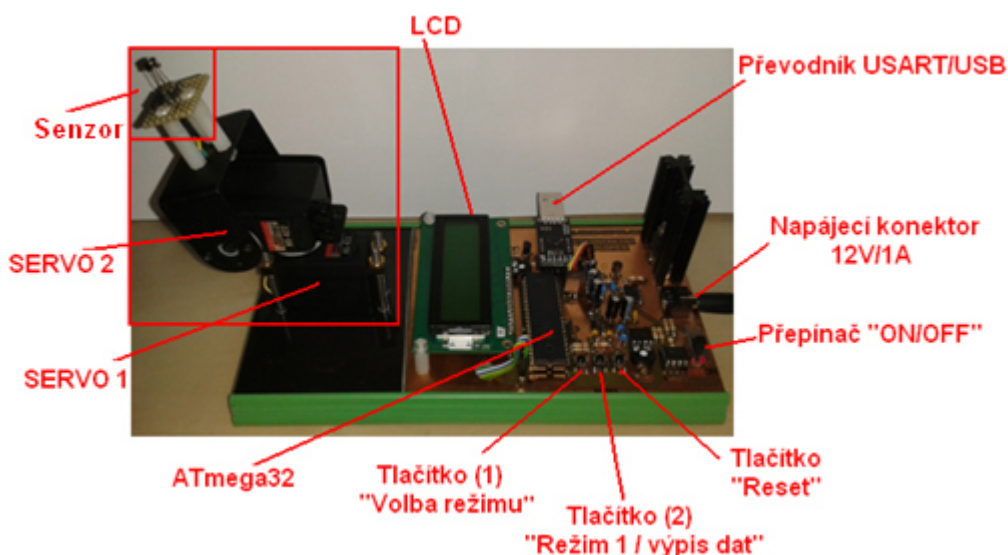


Obrázek 51 - Vývojový diagram finálního programu

6. Ověření funkčnosti testováním

6.1 Ovládání senzoru

Senzor je spuštěn přepnutím přepínače „ON / OFF“ do polohy „ON“. Po spuštění senzoru se servomotory natočí do středové polohy snímané oblasti. Poté senzor čeká na výběr režimu. Výběr režimu je řízen pomocí dvou tlačítek (tlačítko 1 a tlačítko 2). Při prvním stisku tlačítka 1 se spustí režim 1, který proběhne jednou. Při druhém stisku tlačítka 1 se spustí režim 2, který proběhne také jednou. Při stisku tlačítka 2 tehdy, když bylo tlačítko 1 stisknuto pouze jednou, se spustí režim 1, který proběhne znovu jednou. Při stisku tlačítka 2, když bylo tlačítko 1 stisknuto dvakrát, se spustí výpis pole teplot a pole vah na terminál. Výsledný senzor je vidět na obrázku (Obrázek 52).



Obrázek 52 - Výsledný senzor se základním popisem

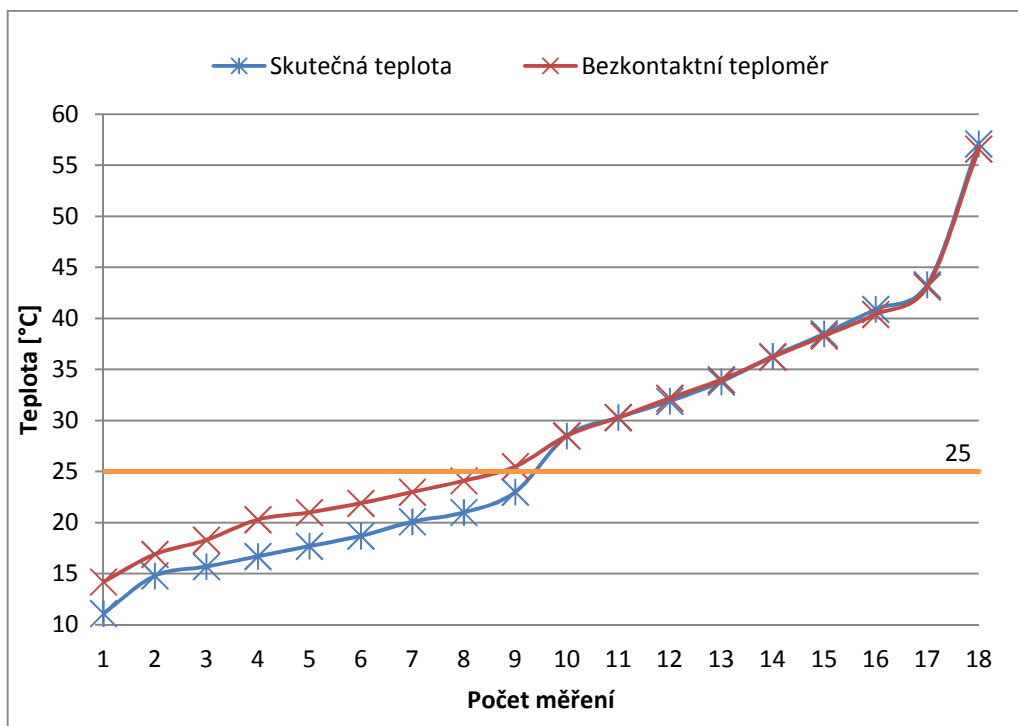
6.2 Testování senzoru

Jelikož senzor pracuje ve dvou režimech (režim 1 a režim 2), probíhalo nejprve testování režimu 1 a poté testování režimu 2.

6.2.1 Testování režimu 1 (jednobodové snímání)

Při testování režimu 1 bylo hlavním úkolem ověřit přesnost senzoru. Testování probíhalo pomocí nahřívajícího (ochlazovaného) modulu s Peltierovým článkem.

Následným přiložením senzoru cca 5mm od modulu jsem zjišťoval, jakou teplotu senzor naměří při známé teplotě modulu. Teplota v místnosti byla po celou dobu měření téměř stabilní. Výsledné hodnoty naměřené na mnou vytvořeném bezkontaktním teploměru, ve srovnání se skutečnou teplotou na modulu, jsou graficky vidět na obrázku (Obrázek 53) spolu s nulovou křivkou (oranžové barvy). Tato křivka naznačuje, od jaké hodnoty teploty se do přístrojového zesilovače načítají kladné hodnoty. A právě hodnoty pod touto křivkou vykazují mírnou nepřesnost.



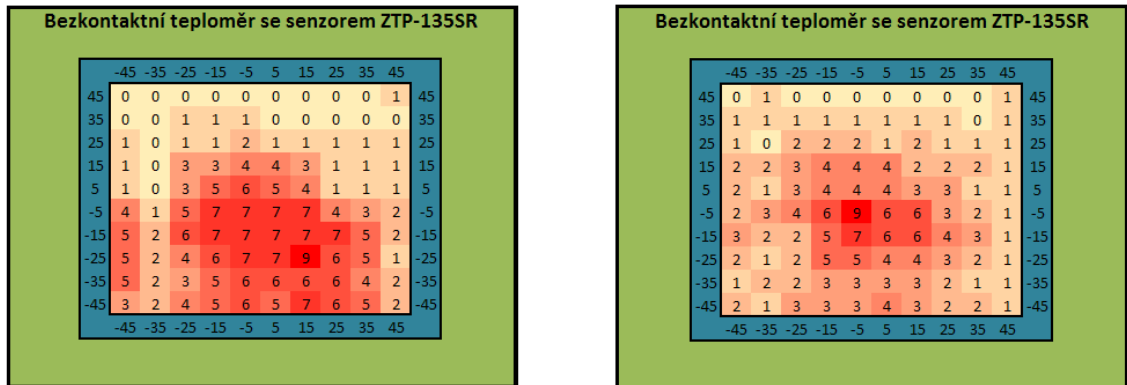
Obrázek 53 - Grafické znázornění naměřených hodnot bezkontaktního teploměru

Při testování analogové části jsem zjistil, že při zpracovávání záporné hodnoty v přístrojovém zesilovači, přístrojový zesilovač nezesiluje přesně 100×, ale zesílení se lehce mění v hodnotách mezi 100 až 120. Toto jsem se částečně snažil vykompenzovat programově, ale i tak korekce nebyla provedena zcela přesně. Proto si myslím, že právě nepřesnost této korekce, byla hlavní příčinou nepřesnosti teploměru. Zejména pak při měření teploty předmětu o teplotě 25 °C a nižší, protože právě při těchto hodnotách teploty zpracovává přístrojový zesilovač záporné hodnoty z termočláнку v senzoru.

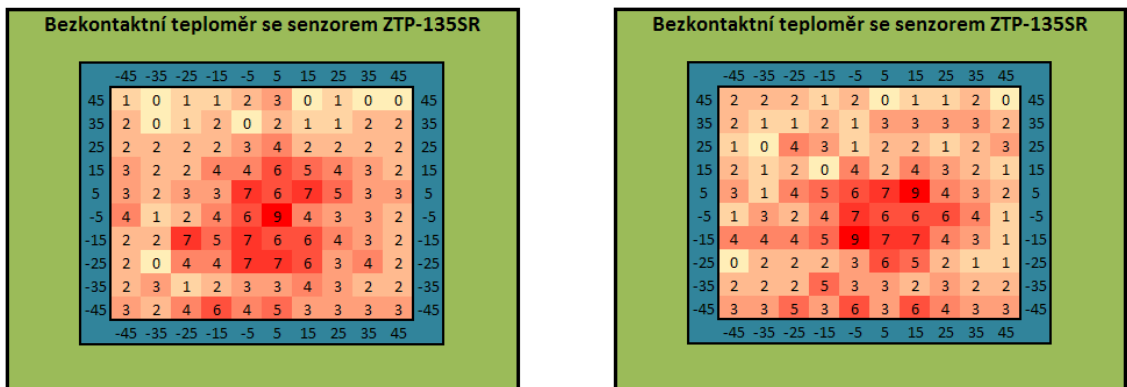
Výsledkem je tedy funkční jednobodový bezkontaktní teploměr, který má při teplotách větších než 25 °C téměř dokonalou přesnost. Při teplotách nižších než 25 °C teploměr vykazoval mírnou nepřesnost v řádech jednotek stupňů celsia.

6.2.2 Testování režimu 2 (plošné snímání)

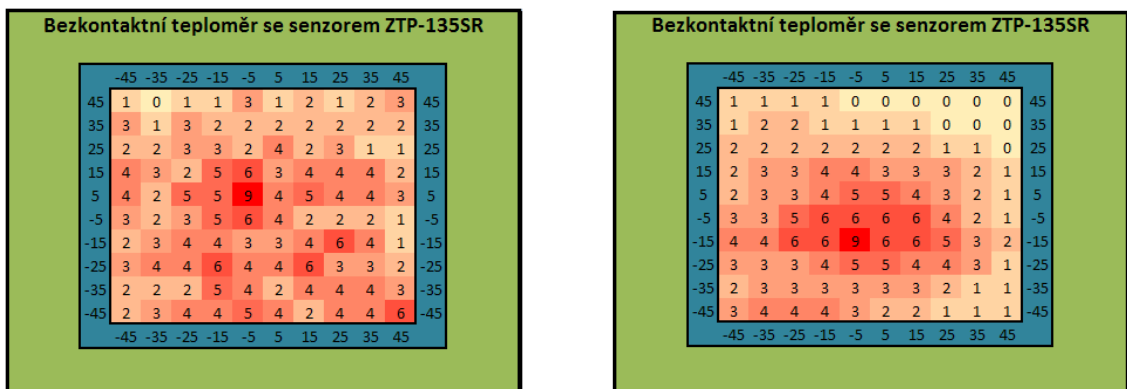
V tomto režimu nebyla hlavním testovacím faktorem přesnost teploměru, ale jeho rozlišovací schopnost. Měření probíhalo při stabilní teplotě okolí. Postupně jsem testoval schopnost rozlišit rozežhátou plotýnku o rozměru cca 10×10 cm na 42 °C na vzdálenost 2 cm, 5 cm, 10 cm, 12 cm a 15 cm. Poté jsem testoval rozlišení lidské ruky položené na stěně při vzdálenosti 10 cm.



Obrázek 54 – Plotna 2 cm od senzoru (vlevo) a 5 cm od senzoru (vpravo)



Obrázek 55 - Plotna 10 cm od senzoru (vlevo) a 12 cm od senzoru (vpravo)



Obrázek 56 - Plotna 15 cm od senzoru (vlevo) a lidská ruka na stěně od 10 cm od senzoru (vpravo)

Na obrázcích (Obrázek 54 a Obrázek 55) je vidět, že plotna byla senzorem nasnímana a lze rozeznat, ve kterých místech se plotna přibližně nacházela. Na obrázku (Obrázek 56) vlevo je vidět plotna nasnímaná při vzdálenosti 15 cm od senzoru. Zde už je obraz značně ovlivněn velkou vzdáleností senzoru od plotny a tak plotnu téměř nelze detekovat. Na obrázku (Obrázek 56) vpravo je obrázek lidské ruky položené na stěně ve vzdálenosti 10 cm od senzoru. I když zde není poznat, že jde o lidskou ruku, je senzorem zachycena změna teplot a naznačen tepelný předmět uprostřed obrazce.

Výsledkem je tedy fungující plošný bezkontaktní teploměr do vzdálenosti 12 cm od snímaného objektu. Při vzdálenosti 15 cm a větší již dochází k značnému ovlivňování výsledku okolními teplotami a velkou vzdáleností senzoru od snímaného objektu.

Vlastnosti vytvořeného modulu jsou potom shrnuty v tabulce (Tabulka 6).

Vlastnosti vytvořeného modulu	
Napájecí napětí	12 V
Proudový odběr	typicky 450 mA
Teplotní rozsah v měřené oblasti	0 °C až 40 °C
Teplotní rozsah snímaného předmětu	-10 °C až 70 °C
Detekční vzdálenost (Plošné snímání)	do 20 cm (do 15 cm)
Přesnost	±2 °C

Tabulka 6 - Přehled vlastností vytvořeného modulu

7. Návrh možných vylepšení

7.1 Jednobodové snímání teploty – režim 1

Při testování režimu 1 se ukázaly jisté chyby. Tyto chyby by mohly být odstraněny lepší programovou korekcí jinak zesilujícího záporného napětí přístrojovým zesilovačem. Dalším možným vylepšením pro větší přesnost teploměru by bylo uvažování různé emisivity materiálu a pomocí mikrokontroléru umožnit zadávat hodnotu emisivity snímaného objektu a následně korigovat výslednou teplotu v závislosti na emisivitě materiálu snímaného předmětu.

7.2 Plošné snímání teploty – režim 2

Pro svou práci jsem použil analogový termoelektrický senzor. Dalším možným vylepšením by tak mohlo být použití lepšího, přesnějšího senzoru, obsahujícího více senzorů v pouzdře například o rozměru 4×4 [19]. Takovéto vylepšení by mohlo přispět k lepšímu rozlišení snímaného objektu při plošném měření teploty.

8. Závěr

V této práci bylo cílem rozebrání problematiky týkající se bezkontaktního měření teploty, zejména pak bolometrů a termočláňkových senzorů a také popis metod návrhu vyhodnocovacích obvodů k těmto senzorům a možnosti polohování senzoru pro zpřesnění informace o snímaném objektu. Pro vyrobení funkčního teploměru umožňujícího plošné snímání teploty byly využity poznatky z teoretického rozboru.

Po navržení jednotlivých částí vyhodnocovací jednotky teploměru (včetně polohovacího mechanismu) byly návrhy těchto částí, kromě početních návrhů, také ověřeny simulacemi a měřeními, jimiž jsem získal skutečné hodnoty navržených částí. Po navržení a ověření jednotlivých částí vyhodnocovací jednotky byl realizován samotný návrh desky plošných spojů a následné vyrobení elektroniky teploměru. Poté byla celá elektronika spolu s polohovacím mechanismem zkonstruována tak, aby bylo možné senzor polohovat.

Výsledkem práce je hotový prototyp bezkontaktního teploměru se senzorem ZTP-135SR umožňujícího plošné snímání teploty měřeného objektu a následné grafické zobrazení nasnímaného obrazce na osobním počítači. Při jednobodovém snímání vykazuje modul přesnost ± 2 °C. Tento detektor je tedy schopen plošně nasnímat a graficky zobrazit teplotu měřeného objektu a splňuje tak požadavky zadání.

Dalším možným vylepšením teploměru by mohla být lepší korekce chyby zesílení záporných hodnot napětí přístrojovým zesilovačem, dále uvažování různých emisivit materiálů a použití lepšího senzoru s více elementy uvnitř jednoho pouzdra například o rozměru 4×4 [19].

9. Literatura

- [1] GENERAL ELECTRIC COMPANY. *Measurement & Control ZTP-135SR: Technická dokumentace*. 2012.
- [2] BERKLEY SPIDERWEB. *Bolometer* [online]. Zář 2013. [přístup 18. 10. 2014]. Dostupné z: <http://bolo.berkeley.edu/bolometers/introduction.html>
- [3] HOŘČÍK, Z. *Zesilovače biologických signálů* [online]. Březen 2014. [přístup 1. 10. 2014]. Dostupné z: https://cw.felk.cvut.cz/wiki/_media/courses/a6m31let/difzes.pdf
- [4] NATIONAL SEMICONDUCTOR. *Adjustable Current Sources: Technická dokumentace*. Březen 2000.
- [5] FAIRCHILD SEMICONDUCTOR. *Programmable Shunt Regulator: Technická dokumentace*. Únor 2011.
- [6] VÁŇA, V. *Mikrokontroléry ATMEL AVR*. BEN-technická literatura, Praha, 2003.
- [7] ATMEL. *ATmega32: Technická dokumentace*. Listopad 2004.
- [8] VOJÁČEK, A. *Thermopile sensors = radiální pyrometry* [online]. Říjen 2005. [přístup 5. 10. 2014]. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/clanek/2005101401>
- [9] Husák, M. *Teplotní senzory* [online]. Leden 2010. [přístup 5. 10. 2014]. Dostupné z: <http://www.micro.feld.cvut.cz/home/X34SES/prednasky/05aTeplotn%A1%20senzory.pdf>
- [10] DUCH M. *Mikroprocesory AVR Tiny* [online]. 2009. [přístup 23. 2. 2015]. Dostupné z: <http://www.spstrutnov.cz/o-skole/projekty/moderni-vyuka-mikroprocesorove-techniky/mikroprocesory-avr-tiny-skripta.pdf/view>
- [11] ANALOG DEVICES. *Low Cost, Low Power, Instrumentation Amplifier AD620: Technická dokumentace*. Červenec 1999.
- [12] HÁJEK J. *Časovač 555 praktická zapojení*. BEN-technická literatura, Praha, 1996.
- [13] NARROW FREEWEB. *UART (USART) komunikujte živě po dvou vodičích* [online]. 2014. [přístup 10. 4. 2015]. Dostupné z: <http://narrow.vzap.eu/elektrotechnika/komunikacni-sbernice/67-uart-usart-komunikujte-seriove-po-dvou-vodicich>

- [14] TERMOKAMERY.CZ. *Konstrukce termokamery* [online]. [přístup 28. 2. 2015]. Dostupné z: <http://www.termokamera.cz/princip-a-funkce/konstrukce-termokamery/>
- [15] FLUKE. *Hodnoty emisivity běžných materiálů.* [online]. 2015. [přístup 25. 4. 2015]. Dostupné z: http://www.fluke-cz.cz/comx/show_product.aspx?locale=czcs&pid=37822
- [16] GENERAL ELECTRIC COMPANY. *Thermoelectric Infrared Thermopile Sensors: Technická dokumentace.* 2013.
- [17] SCHILZ J. *Thermoelectric Infrared Sensors (Thermopiles) for Remote Temperature Measurements* [online]. 2000. [přístup 2. 3. 2015]. Dostupné z: <http://www.tuhh.de/mt/ftir/lib/RemoteTemperature/pyrometry.pdf>
- [18] VALENTA P. *Princip termočlánku* [online]. 2006 [přístup 2. 3. 2015]. Dostupné z: <http://referaty-seminarky.cz/princip-termoclanku/>
- [19] DEXTER. *ST60 Quad thermopile detector.* [online]. 2015 [přístup 20. 4. 2015]. Dostupné z: <https://www.dexterresearch.com/?module=Page&sID=st60-quad>
- [20] MATOUŠEK D. *Práce s mikrokontroléry ATMEL AVR ATmega 16, 4. díl.* BEN-technická literatura, Praha, 2006.
- [21] MANN B. *C pro mikrokontroléry.* BEN-technická literatura, Praha, 2003.
- [22] VEDRAL J., FISHER J. *Elektronické obvody pro měřicí techniku.* ČVUT, Praha, 2004.

10. Seznam obrázků

Obrázek 1 - Struktura bolometru [9].....	3
Obrázek 2 - Konstrukce bolometru [14]	3
Obrázek 3 - Termoelektrický jev [16]	4
Obrázek 4 - Měření teploty předmětu [17]	4
Obrázek 5 - Znázornění vnitřního zapojení termoelektrického senzoru.....	6
Obrázek 6 - Závislost účinnosti na zorném úhlu senzoru [1]	7
Obrázek 7 - Převodní tabulka odporu na teplotu a graf převodu napětí na teplotu [1] ...	8
Obrázek 8 - Schéma zapojení rozdílového zesilovače se sledovači [3]	10
Obrázek 9 - Schéma zapojení přístrojového zesilovače [3][22]	11
Obrázek 10 - Schéma zapojení neinvertující sčítačky	12
Obrázek 11 - Základní zapojení proudové reference LM334 vlevo a graf závislosti výstupního proudu na rozdílu napětí ΔV ($V+$ a $V-$) vpravo [4]	13
Obrázek 12 - Zapojení proudové reference LM334 s teplotní kompenzací [4].....	13
Obrázek 13 - Kompletní zapojení vyhodnocovací jednotky pro zobrazení jedné teploty	14
Obrázek 14 - Sestava senzoru a dvou servomotorů	15
Obrázek 15 - Průběh generovaného PWM signálu ve středních a krajních polohách....	16
Obrázek 16 - Princip generování PWM signálu v režimu „Rychlý režim PWM“ [10]..	16
Obrázek 17 - Princip generování PWM signálu v režimu „Fázově korigovaný režim PWM“ [10]	17
Obrázek 18 - Zapojení USART k ATmega32	18
Obrázek 19 - Příklad datového rámce USART	18
Obrázek 20 - Zapojení se zobrazením na terminálu	19
Obrázek 21 - Rozložení matice teplot o rozměru 10×10	20
Obrázek 22 - Navržené schéma zapojení přístrojového zesilovače.....	22
Obrázek 23 - Simulace přístrojového zesilovače.....	23
Obrázek 24 - Schéma zapojení neinvertující sčítačky	26
Obrázek 25 - Zjednodušené vnitřní zapojení obvodu TL431 [5]	27
Obrázek 26 - Schéma zapojení napěťové reference TL431.....	27
Obrázek 27 - Schéma zapojení zdroje proudu	29

Obrázek 28 - Schéma zapojení kladného stabilizátoru napětí z 12 V na 5 V	30
Obrázek 29 - Schéma zapojení zdroje záporného napětí [12]	30
Obrázek 30 - Schéma zapojení záporného stabilizátoru z -12 V na -5 V	31
Obrázek 31 - Schéma zapojení digitální části	33
Obrázek 32 - Blokový diagram hlavních částí programu	33
Obrázek 33 - Vývojový diagram hlavní smyčky programu	34
Obrázek 34 - Vývojový diagram funkce pro převod napětí termočlánku na hodnotu teploty	35
Obrázek 35 - Vývojový diagram funkce pro převod odporu termistoru na hodnotu teploty	36
Obrázek 36 - Jednobodový bezkontaktní senzor teploty	38
Obrázek 37 - Nasazení hliníkové trubičky na senzor	38
Obrázek 38 - Testované trubičky	39
Obrázek 39 - Ukázka polohování servomotorů	40
Obrázek 40 - Schéma zapojení servomotorů k mikrokontroléru	40
Obrázek 41 - Připojení řídicích vodičů servomotorů k mikrokontroléru	41
Obrázek 42 - Náčrt zkrácení periody na 20ms	42
Obrázek 43 - Vývojový diagram programu pro ovládání servomotorů	43
Obrázek 44 - Krajní a středové polohy servomotorů	44
Obrázek 45 - Vývojový diagram funkce pro převod pole teplot na váhy teplot	45
Obrázek 46 - Převodník USART/USB CP2102	46
Obrázek 47 - Schéma zapojení vyhodnocovací jednotky pro zobrazení matice teplot o rozměru 10×10	46
Obrázek 48 - Hlavní okno terminálu s načtenými maticemi	47
Obrázek 49 - Obraz nasnímaného předmětu plošným senzorem	47
Obrázek 50 - Blokové schéma finálního programu	48
Obrázek 51 - Vývojový diagram finálního programu	49
Obrázek 52 - Výsledný senzor se základním popisem	50
Obrázek 53 - Grafické znázornění naměřených hodnot bezkontaktního teploměru	51
Obrázek 54 – Plotna 2 cm od senzoru (vlevo) a 5 cm od senzoru (vpravo)	52
Obrázek 55 - Plotna 10 cm od senzoru (vlevo) a 12 cm od senzoru (vpravo)	52
Obrázek 56 - Plotna 15 cm od senzoru (vlevo) a lidská ruka na stěně od 10 cm od senzoru (vpravo)	52

Obrázek 57 - Schéma zapojení modulu pro zobrazení jedné teploty	i
Obrázek 58 - Schéma zapojení celého modulu.....	ii
Obrázek 59 - Navržená DPS modulu pro zobrazení jedné teploty strana TOP	iii
Obrázek 60 - Navržená DPS modulu pro zobrazení jedné teploty strana BOTTOM.....	iii
Obrázek 61 - DPS celého modulu strana TOP	iv
Obrázek 62 - DPS celého modulu strana BOTTOM	iv
Obrázek 63 - Konstrukce modulu pro zobrazení jedné teploty	v
Obrázek 64 - Konstrukce finálního modulu pohled z boku.....	v
Obrázek 65 - Konstrukce finálního modulu pohled shora.....	v

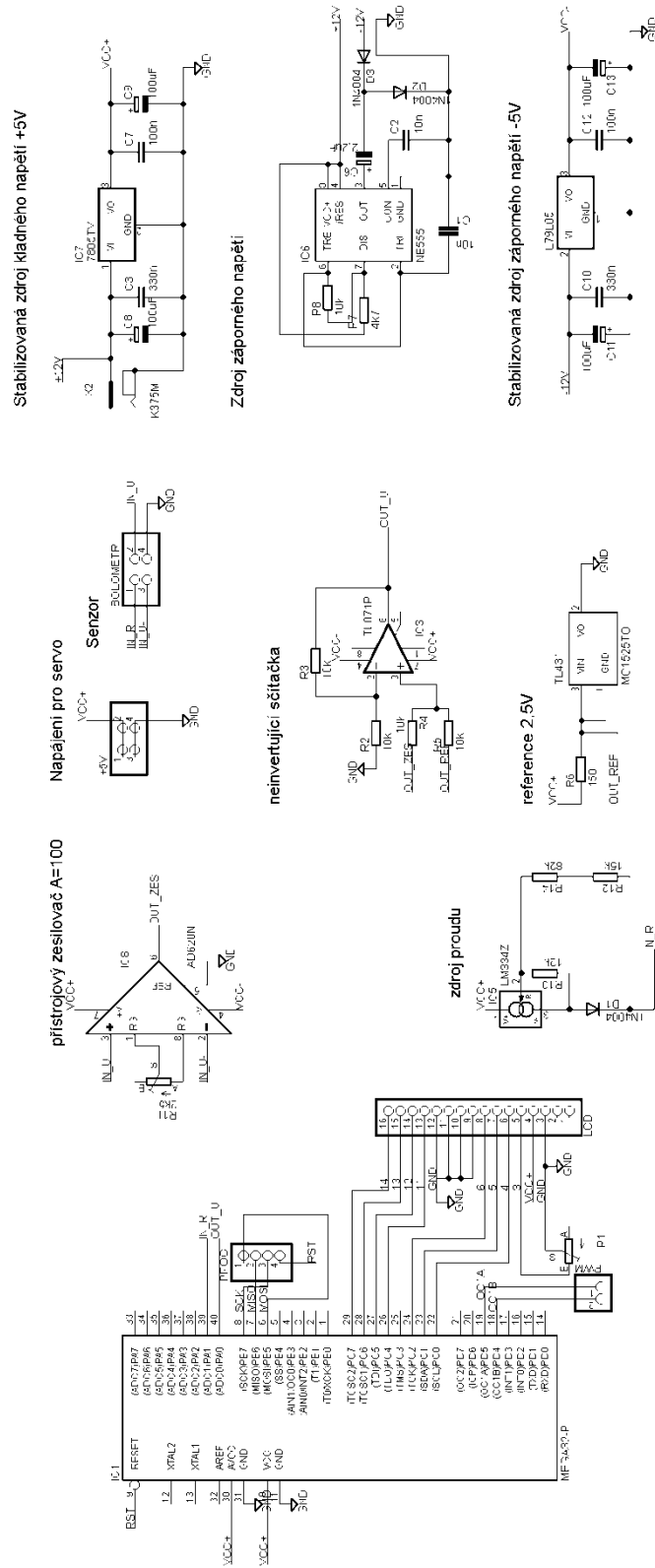
11. Seznam tabulek

Tabulka 1 - Emisivity vybraných materiálů [15].....	5
Tabulka 2 - Přehled základních vlastností přístrojového zesilovače AD620 [11].....	24
Tabulka 3 - Přehled vypočtených hodnot rezistorů pro ISET=10 μA	28
Tabulka 4 - Přehled skutečných hodnot rezistorů pro ISET=10 μA	28
Tabulka 5 - Výsledky testovaných trubiček	39
Tabulka 6 - Přehled vlastností vytvořeného modulu	53
Tabulka 7- Seznam součástí.....	vii

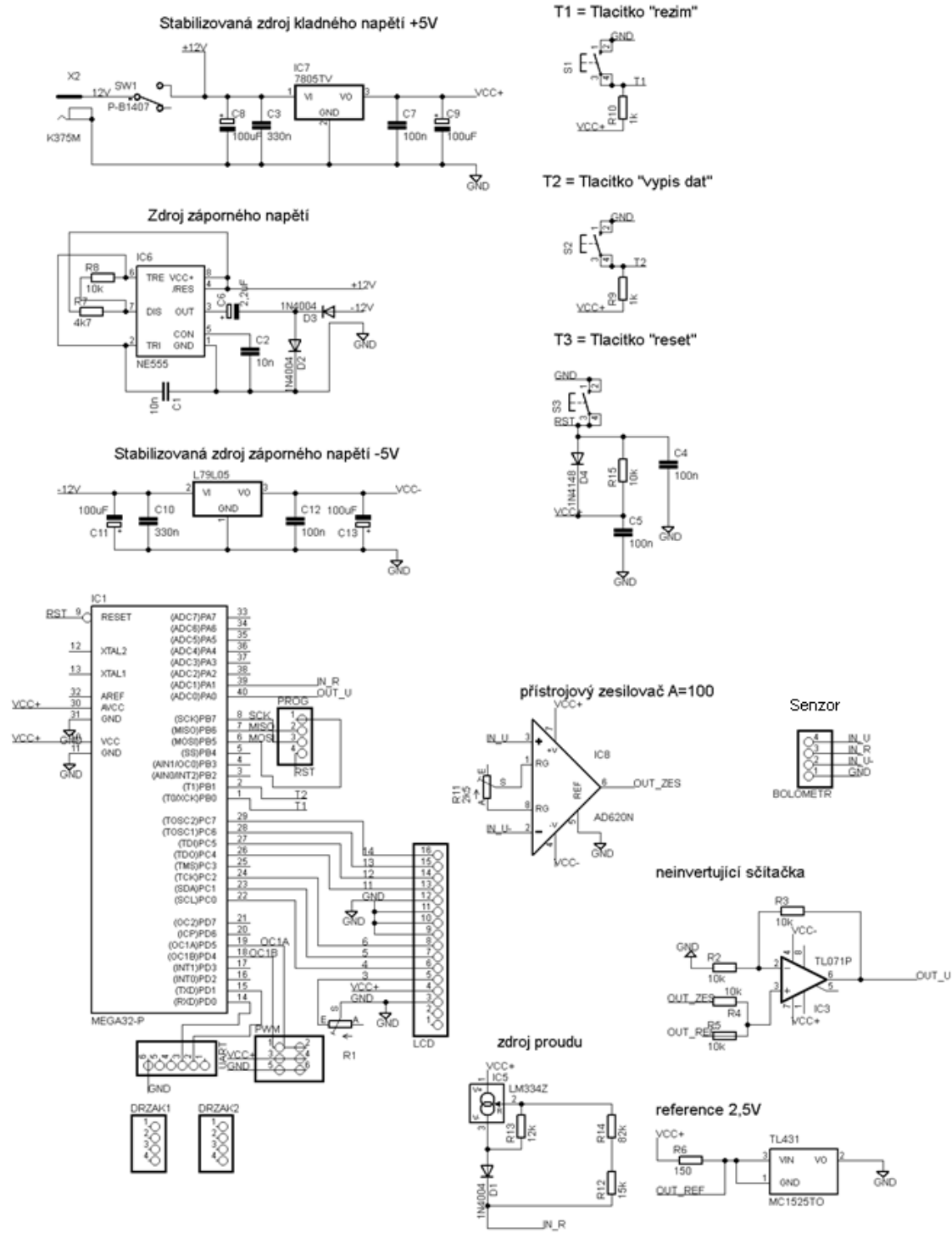
12. Seznam příloh

A.	Návrh DPS	i
B.	Konstrukce senzoru.....	v
C.	Seznam součástí	vi
D.	Zdrojový kód programu pro řídicí jednotku celého modulu.....	viii

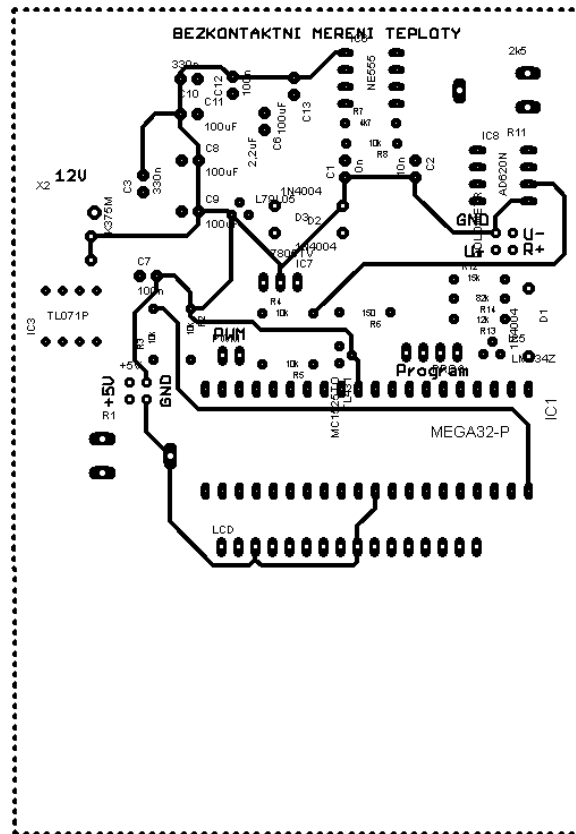
A. Návrh DPS



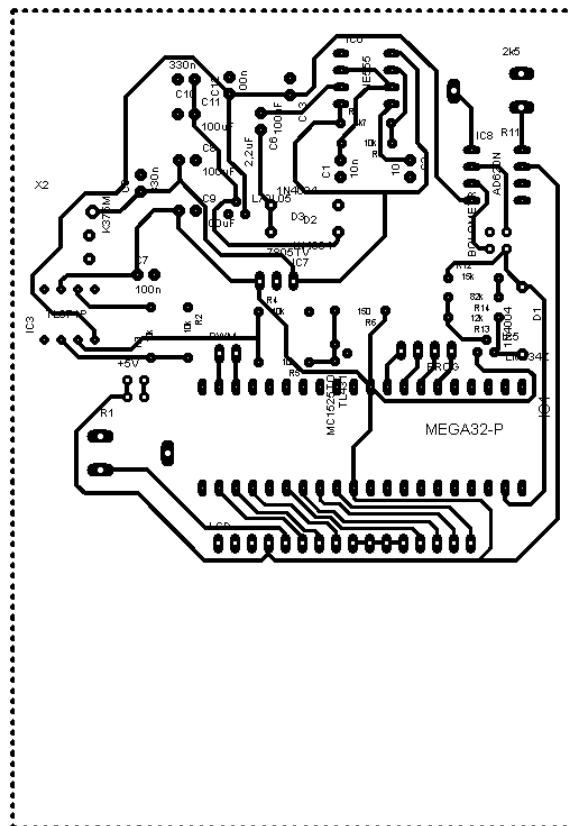
Obrázek 57 - Schéma zapojení modulu pro zobrazení jedné teploty



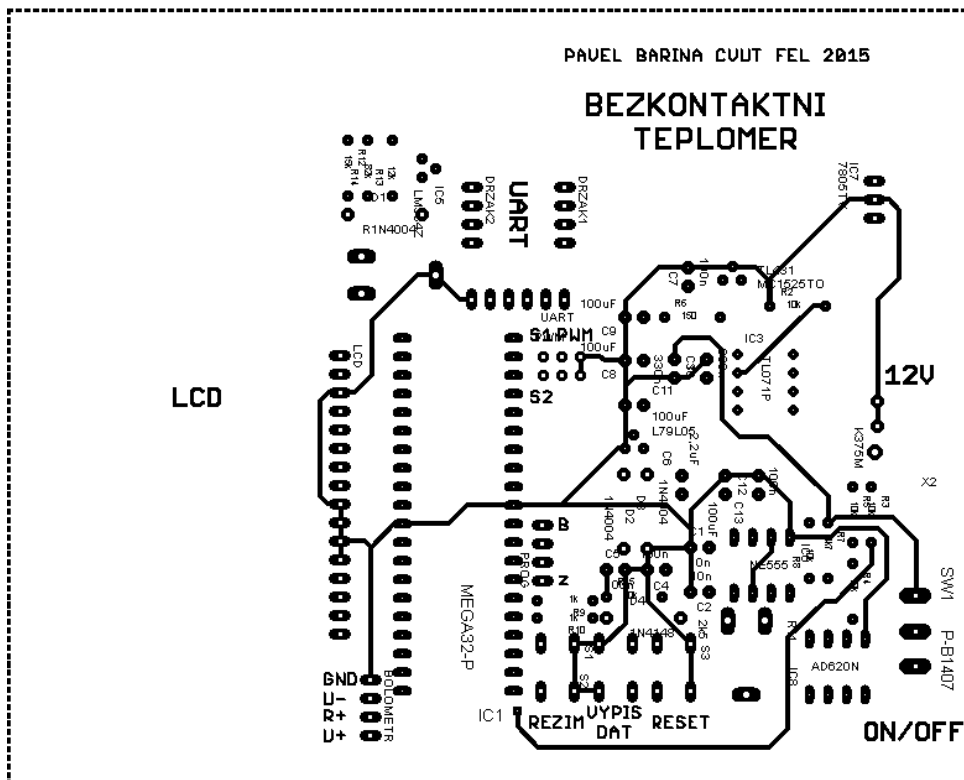
Obrázek 58 - Schéma zapojení celého modulu



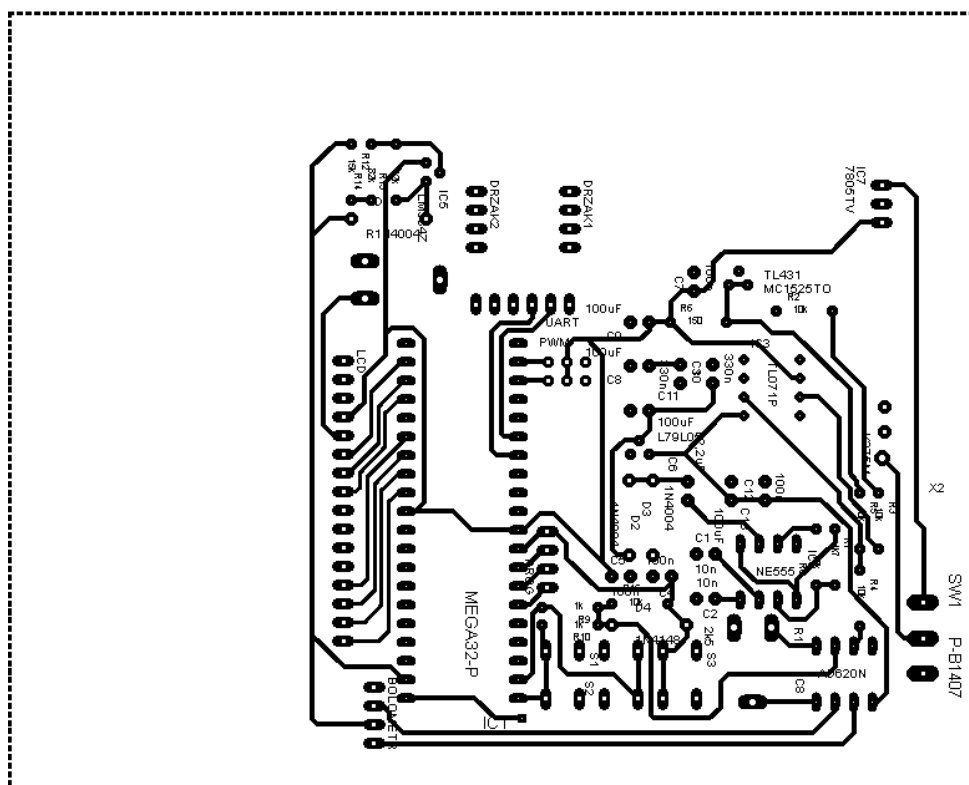
Obrázek 59 - Navržená DPS modulu pro zobrazení jedné teploty strana TOP



Obrázek 60 - Navržená DPS modulu pro zobrazení jedné teploty strana BOTTOM



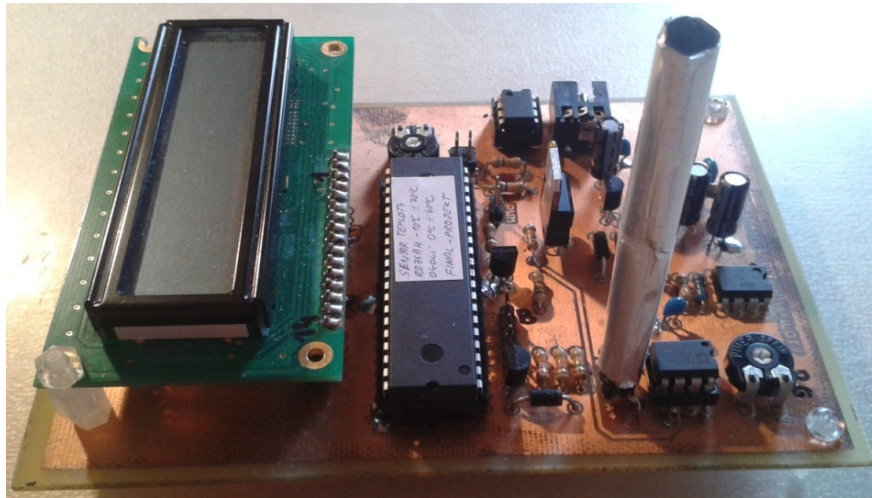
Obrázek 61 - DPS celého modulu strana TOP



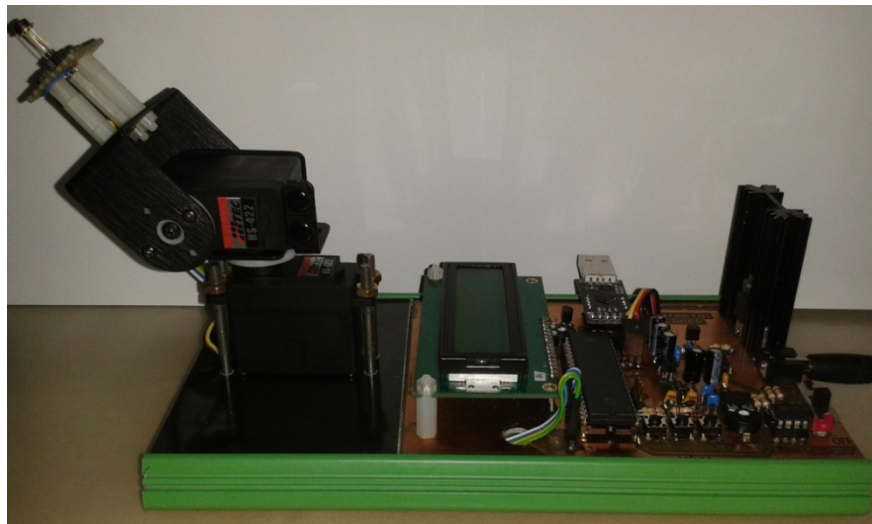
Obrázek 62 - DPS celého modulu strana BOTTOM

Rozměr desky 106 x 130 [mm]

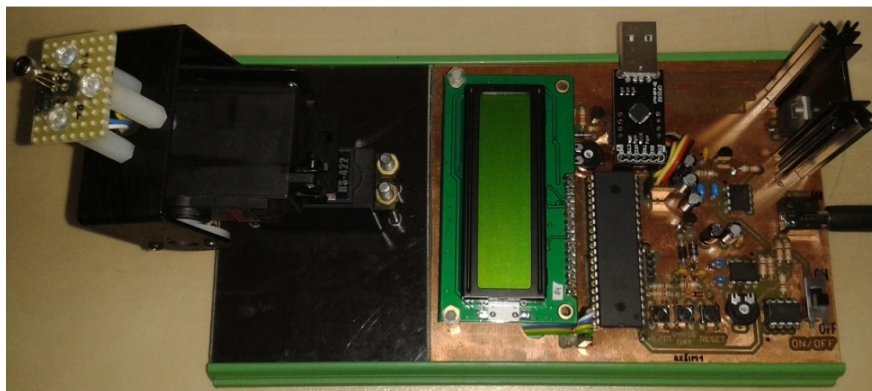
B. Konstrukce senzoru



Obrázek 63 - Konstrukce modulu pro zobrazení jedné teploty



Obrázek 64 - Konstrukce finálního modulu pohled z boku



Obrázek 65 - Konstrukce finálního modulu pohled shora

C. Seznam součástek

Označení	Hodnota/typ	Pouzdro	Popis
C1	10n	C2.-3	keramický kondenzátor
C2	10n	C2.-3	keramický kondenzátor
C3	330n	C2.-3	keramický kondenzátor
C4	100n	C2.-3	keramický kondenzátor
C5	100n	C2.-3	keramický kondenzátor
C6	2,2 μ	E2,5-5	elektrolytický kondenzátor
C7	100n	C2.-3	keramický kondenzátor
C8	100 μ	E2,5-5	elektrolytický kondenzátor
C9	100 μ	E2,5-5	elektrolytický kondenzátor
C10	330n	C2.-3	keramický kondenzátor
C11	100 μ	E2,5-5	elektrolytický kondenzátor
C12	100n	C2.-3	keramický kondenzátor
C13	100 μ	E2,5-5	elektrolytický kondenzátor
R1	5k	CA9V	rezistorový trimer
R2	10k	0204/7	rezistor
R3	10k	0204/7	rezistor
R4	10k	0204/7	rezistor
R5	10k	0204/7	rezistor
R6	150	0204/7	rezistor
R7	4k7	0204/7	rezistor
R8	10k	0204/7	rezistor
R9	1k	0204/7	rezistor
R10	1k	0204/7	rezistor
R11	2k5	CA9V	rezistorový trimer
R12	15k	0204/7	rezistor
R13	12k	0204/7	rezistor
R14	82k	0204/7	rezistor
R15	10k	0204/7	rezistor
D1	1N4004	DO41-10	dioda

D2	1N4004	DO41-10	dioda
D3	1N4004	DO41-10	dioda
D4	1N4148	DO41-10	dioda
S1	-	B3F-10XX	spínací tlačítko
S2	-	B3F-10XX	spínací tlačítko
S3	-	B3F-10XX	spínací tlačítko
SW1	-	P-B1407	přepínač
X2	K375M	K375M	napájecí konektor
DRAZK1	-	4pin	pinová hlava
DRAZK2	-	4pin	pinová hlava
UART	-	6pin	pinová hlava
PROG	-	4pin	pinová hlava
BOLOMETR	-	4pin	pinová hlava
PWM	-	2x3pin	pinová hlava
LCD	-	16pin	pinová hlava
IC1	MEGA32-P	DIL40	mikrokontrolér ATmega32
TL431	MC1525TO	TO92	napěťová reference
IC3	TL071P	DIL8	operační zesilovač
L79L05		TO92	stabilizátor záporného napětí
IC5	LM334Z	TO92	proudový zdroj
IC6	NE555	DIL8	časovač 555
IC7	L7805TV	TO220V	stabilizátor kladného napětí
IC8	AD620N	DIL8	přístrojový zesilovač

Tabulka 7- Seznam součástek

D. Zdrojový kód programu pro řídicí jednotku celého modulu

```
/******  
Chip type      : ATmega32  
Program type   : Application  
AVR Core Clock frequency: 2,000000 MHz  
Memory model   : Small  
External RAM size : 0  
Data Stack size : 512  
*****/  
  
#include <mega32.h>  
  
// Alphanumeric LCD functions  
#include <alcd.h>  
  
#include <stdio.h>  
#include <delay.h>  
#include <string.h>  
  
char str1[20];  
char str2[20];  
float zaklad1, prirustek1, dolni_mez1, horni_mez1, tolerance1, teplota1, teplota11;  
char l, m;  
unsigned char zesileni;  
float teplota_terce;  
float zaklad2, prirustek2, dolni_mez2, horni_mez2, tolerance2, teplota2, teplota_okoli;  
char j, k;  
  
// Timer1 overflow interrupt service routine  
interrupt [TIM1_OVF] void timer1_ovf_isr(void)  
{  
// prerušení pro stále začíná komparace od hodnoty 1AF  
TCNT1H=0x1AF >> 8;  
TCNT1L=0x1AF & 0xff;  
}  
  
//funkce pro A/D převod  
int hodnota(char channel)  
{  
    ADMUX = channel | 0x40; //nastavení reference AVCC, a volba kanálu  
    delay_us(50);  
  
    ADCSRA |= 0x40; //aktivace bitu ADSC,ktery spusti převod  
    while ((ADCSRA & 0x10)==0); //podmínka, která hlídá dobu převodu  
  
    ADCSRA |= 0x10; //deaktivace bitu ADSC,ktery spusti převod  
    return ADCW; // vrat převedenou hodnotu napětí  
}
```

//funkce pro výpis na LCD

```
void LCD (void)
{
    lcd_clear(); // vyčištění pro odstranění nežádoucích chyb
    lcd_gotoxy(0,0); //poloha umístění textu na druhém řádku (x=0, y=1)
    lcd_puts(str1);
    lcd_gotoxy(0,1); //poloha umístění textu na druhém řádku (x=0, y=1)
    lcd_puts(str2); //výpis proměnné na druhém řádku
}
```

//vypočet teploty termoclanku

```
float teplota_U(float napeti_U)
```

```
{
    for (l=0;l<9;l++)
    {
        if(l==0)
        {
            prirustek1 = 0.026;
            zaklad1 = 10.6;
            teplota1 = 80;
        }

        if(l==1)
        {
            prirustek1 = 0.02;
            zaklad1 = 8;
            teplota1 = 70;
        }

        if(l==2)
        {
            prirustek1 = 0.019;
            zaklad1 = 6;
            teplota1 = 60;
        }

        if(l==3)
        {
            prirustek1 = 0.021;
            zaklad1 = 4.1;
            teplota1 = 50;
        }

        if(l==4)
        {
            prirustek1 = 0.011;
            zaklad1 = 2;
            teplota1 = 40;
        }
    }
}
```

```

}

if(l==5)
{
prirustek1 = 0.019;
zaklad1 = 0.9;
teplota1 = 30;
}

if(l==6)
{
prirustek1 = 0.0075;
zaklad1 = -1;
teplota1 = 20;
}

if(l==7)
{
prirustek1 = 0.0125;
zaklad1 = -1.75;
teplota1 = 10;
}

if(l==8)
{
prirustek1 = 0.013;
zaklad1 = -3;
teplota1 = 0;
}

//podmínka pro kladné vstupní napětí tj 25°C až 70°C
//při kladném vstupním napětí má AD620 zesílení cca 100
//v této podmínce nemusím mít teplotu1 typu float, protože není nikdy teplota záporná
if ( zaklad1 > 0 )
{
zaklad1 = (((zaklad1 *100)/1000)*(1))+2.42; //reference je sice 2.47V, reálně ale právě hodnota 2.42
//mi zaručí, že při nulovém vstupu je teplota přesně 25°C dle datasheetu
prirustek1 = ((prirustek1*100)/1000);

for(m=0; m<100; m++)
{
tolerance1 = zaklad1 * 0.01;
dolni_mez1 = zaklad1 - tolerance1;
horni_mez1 = zaklad1 + tolerance1;

if ((dolni_mez1 <= napeti_U) && (napeti_U <= horni_mez1))
{
teplota_terce = teplota1;
}
}
}

```

```

    teplota1 = teplota1 - 0.1;
    zaklad1 = zaklad1 - prirustek1;
}
}
//podmínka pro záporné vstupní napětí tj -10°C až 24°C
//při záporném vstupním napětí má AD620 zesílení cca od 120 do 145
//v této podmínce musím mít teplotu1 typu float, protože od určití hodnoty zaklad1 je teplota záporná
if ( zaklad1 <= 0 )
{
    zesileni = 145;

    if ( zaklad1 < -1.5 )
    {
        zesileni = 115;
    }

    teplota11 = (float) teplota1;
    zaklad1 = (((zaklad1 * zesileni)/1000)*(1))+2.42;
    prirustek1 = ((prirustek1 * zesileni)/1000);

    for(m=0; m<100; m++)
    {
        tolerance1 = zaklad1 * 0.01;
        dolni_mez1 = zaklad1 - tolerance1;
        horni_mez1 = zaklad1 + tolerance1;

        if ((dolni_mez1 <= napeti_U) && (napeti_U <= horni_mez1))
        {
            teplota_terce = teplota11;
        }

        teplota11 = teplota11 - 0.1 ;
        zaklad1 = zaklad1 - prirustek1;
    }
}
return (teplota_terce);
}

```

//vypočet teploty termistoru

```

float teplota_R(float odpor_R)
{
    for (j=0;j<8;j++)
    {
        if(j==0)
        {

```

```
prirustek2 = 242;  
zaklad2 = 53200;  
teplota2 = 40;  
}
```

```
if(j==1)  
{  
prirustek2 = 306;  
zaklad2 = 65300;  
teplota2 = 35;  
}
```

```
if(j==2)  
{  
prirustek2 = 388;  
zaklad2 = 80600;  
teplota2 = 30;  
}
```

```
if(j==3)  
{  
prirustek2 = 500;  
zaklad2 = 100000;  
teplota2 = 25;  
}
```

```
if(j==4)  
{  
prirustek2 = 640;  
zaklad2 = 125000;  
teplota2 = 20;  
}
```

```
if(j==5)  
{  
prirustek2 = 840;  
zaklad2 = 157000;  
teplota2 = 15;  
}
```

```
if(j==6)  
{  
prirustek2 = 1080;  
zaklad2 = 199000;  
teplota2 = 10;  
}
```

```
if(j==7)  
{
```

```

prirustek2 = 1420;
zaklad2 = 253000;
teplota2 = 5;
}

for(k=0;k<50;k++)
{
    tolerance2 = (zaklad2 * 0.03);
    dolni_mez2 = zaklad2 - tolerance2;
    horni_mez2 = zaklad2 + tolerance2;

    if ((dolni_mez2 <= odpor_R) &&( odpor_R <= horni_mez2))
    {
        teplota_okoli = teplota2;
    }

    teplota2 = teplota2 - 0.1;
    zaklad2 = zaklad2 + prirustek2;
}
}
return (teplota_okoli);
}

```

//hlavní program

```

void main(void)
{
    float pomer, rozsah, horni_hranice, spodni_hranice, prirustek, pocet_barev;
    float pole[10][10];

    char pole_barev[10][10];
    char prirustek_pwm;
    int pocet;
    char a, b, z, i, j, rezim, tlacitko1, tlacitko2;

    unsigned long int prumer11, prumer12;
    unsigned long int prumer21, prumer22;

    float U1, U2, R1, R2, vysledna_T1, vysledna_T2;
    float vysledek11, vysledek12, vysledek1R; // deklarace výsledku ve formátu číslo s desetinou čárkou
    float vysledek21, vysledek22, vysledek2R;

    // Port D initialization
    // Func7=In Func6=In Func5=Out Func4=Out Func3=In Func2=In Func1=In Func0=In
    // State7=T State6=T State5=0 State4=0 State3=T State2=T State1=T State0=T
    PORTD=0x00;
    DDRD=0x30;

    // Timer/Counter 1 initialization
    // Clock source: System Clock

```

```

// Clock value: 31,250 kHz
// Mode: Fast PWM top=0x03FF
// OC1A output: Non-Inv.
// OC1B output: Non-Inv.
// Noise Canceler: Off
// Input Capture on Falling Edge
// Timer1 Overflow Interrupt: On
// Input Capture Interrupt: Off
// Compare A Match Interrupt: Off
// Compare B Match Interrupt: Off

TCCR1A=0xA3; // nastavení PWM do režimu fast PWM 3FF
TCCR1B=0x0B; // nastavení hodino frekvence na 31,25kHz
TCNT1H=0x01;
TCNT1L=0xAF; // výchozí komparační hodnota 1.8ms tj. 1AF
ICR1H=0x00;
ICR1L=0x00;
OCR1AH=0x01; // nastavení polohy serva 1
OCR1AL=0xDD;
OCR1BH=0x01; // nastavení polohy serva 2
OCR1BL=0xCF;

// USART initialization
// Communication Parameters: 8 Data, 1 Stop, No Parity
// USART Receiver: Off
// USART Transmitter: On
// USART Mode: Asynchronous
// USART Baud Rate: 9600
UCSRA=0x00;
UCSRB=0x08; // nastavení přenosu na vysílání
UCSRC=0x86; // nastavení 8dat, 1stop, bez parity a asynchronní přenos
UBRRH=0x00; // nastavení rychlosti přenosu na 9600 baudů
UBRRL=0x0C;

// Timer(s)/Counter(s) Interrupt(s) initialization
TIMSK=0x04;

// Analog Comparator initialization
// Analog Comparator: Off
// Analog Comparator Input Capture by Timer/Counter 1: Off
ACSR=0x80;
SFIOR=0x00;

// Global enable interrupts
#asm("sei")

lcd_init(16); // automatická inicializace displeje pomocí wizardu
ADMUX = 0x40; //nastavení reference AVCC

```

```

ADCSRA = 0x86; //nastavení aktivace převodníku bitem ADEN
    //a dělicí poměr 64 pomocí bitů ADPS2 a ADPS1
pomer = 5.06/1023.0; //převodní poměr pro přepočítání z binární na dekadickou hodnotu
    // hodnota 5.06 je hodnota napájecího napětí mikrokontroléru

tlacitko1=0;
tlacitko2=0;
lcd_clear();
lcd_gotoxy(1,0);
lcd_putsf("Senzor teploty");
lcd_gotoxy(2,1);
lcd_putsf("Zvolte režim");

```

// Začátek nekonečné smyčky

```

while (1)
{

    if(PINB.0 == 0)
    {
        tlacitko1++;
        delay_ms(300);
    }

    if(PINB.1 == 0)
    {
        tlacitko2++;
        delay_ms(300);
    }

    if ((tlacitko1 == 0) || (tlacitko1 == 2))
    {
        lcd_clear();
        lcd_gotoxy(1,0);
        lcd_putsf("Senzor teploty");
        lcd_gotoxy(2,1);
        lcd_putsf("zvolte režim");
    }

    if (tlacitko2 == 3)
    {
        lcd_clear();
        lcd_gotoxy(1,0);
        lcd_putsf("Senzor teploty");
        lcd_gotoxy(1,1);
        lcd_putsf("Cteni dat...");

        for(b=0;b<10;b++)
        {
            printf("%1.1f,%1.1f,",pole[0][b], pole[1][b]);

```



```

    printf("%1.1f,%1.1f,",pole[2][b], pole[3][b]);
    printf("%1.1f,%1.1f,",pole[4][b], pole[5][b]);
    printf("%1.1f,%1.1f,",pole[6][b], pole[7][b]);
    printf("%1.1f,%1.1f\n",pole[8][b], pole[9][b]);
    delay_ms(300);
}
for(j=0;j<10;j++)
{
    printf("%1.0d,%1.0d,%1.0d,%1.0d,",pole_barev[0][j], pole_barev[1][j], pole_barev[2][j], pole_barev[3][j]);
    printf("%1.0d,%1.0d,%1.0d,%1.0d,",pole_barev[4][j], pole_barev[5][j], pole_barev[6][j], pole_barev[7][j]);
    printf("%1.0d,%1.0d\n",pole_barev[8][j], pole_barev[9][j]);
    delay_ms(300);
}

tlacitko1 = 0;
tlacitko2 = 0;
}

if ((tlacitko1 == 1)||(tlacitko2 == 1))
{
    lcd_clear();
    sprintf(str1," Senzor teploty");
    sprintf(str2," Merim...");
    LCD (); // volání funkce výpisu na LCD
    prumer11=0;
    prumer12=0;
    vysledna_T1=0;

    for(i=0;i<3;i++) // funkce na průměrování hodnot z 32 vzorků
    {

        for(pocet=0;pocet<1024;pocet++) // funkce na průměrování hodnot z 32 vzorků
        {
            prumer11 += hodnota(0);
            prumer12 += hodnota(1);
        }
        prumer11 >>= 10; //posun vpravo o 5 = děleno 32, rychlejší než obvykle průměr dělit počtem hdonot
        prumer12 >>= 10; //posun vpravo o 5 = děleno 32

        vysledek11 = (float) prumer11 * pomer; // výsledek převeden přes poměr na dekadickou hodnotu
        vysledek12 = (float) prumer12 * pomer;
        vysledek1R = vysledek12/10e-6; //prepocet vysledku2 na hodnotu odporu

        U1 = teplota_U(vysledek11);
        R1 = teplota_R(vysledek1R);

        vysledna_T1 += (U1 + (R1 - 25));
    }
    vysledna_T1 = (vysledna_T1/3);
}

```

```

printf(str1,"%1.6f %1.5f ", vysledek11, vysledek12); // deklarace proměnné co se bude vypisovat na druhý řádek
printf(str2,"TEPLOTA=%1.1f C", vysledna_T1);

LCD (); // volání funkce výpisu na LCD
delay_ms(3000);

tlacitko1=2;
tlacitko2=0;
}
if (tlacitko1 == 3)
{
OCR1A = 0x01CF;
OCR1B = 0x01DC;
pocet_barev=9;
spodni_hranice=100;
horni_hranice=0;
lcd_clear();
lcd_gotoxy(1,0);
lcd_putsf("Senzor teploty");
lcd_gotoxy(0,1);
lcd_putsf("Probiha mereni..");
delay_ms(150);

for (j=0; j<10; j++)
{
prirustek_pwm = 0;
for (i=0; i<10; i++)
{
OCR1A = OCR1A + prirustek_pwm;
prumer21=0;
prumer22=0;
for(z=0;z<128;z++) // funkce na průměrování hodnot z 16 vzorků
{
prumer21 += hodnota(0);
prumer22 += hodnota(1);
}
prumer21 >>= 7; //posun vpravo o 4 = děleno 16, rychlejší než obvyčejně průměr dělit počtem hdonot
prumer22 >>= 7; //posun vpravo o 4 = děleno 16

vysledek21 = (float) prumer21 * pomer; // výsledek převeden přes pomer na dekadickou hodnotu
vysledek22 = (float) prumer22 * pomer;
vysledek2R = vysledek22/10e-6; //prepocet vysledku2 na hodnotu odporu

U2 = teplota_U(vysledek21);
R2 = teplota_R(vysledek2R);

vysledna_T2 = (U2 + (R2 - 25));
pole[i][j] = vysledna_T2;

```

```

if (pole[i][j]<spodni_hranice)
{
    spodni_hranice = pole[i][j];
}
if (pole[i][j]>horni_hranice)
{
    horni_hranice = pole[i][j];
}
prirustek_pwm = 3;
delay_ms(400);
}
OCR1A = 0x01CF;
OCR1B = OCR1B - 3;
delay_ms(50);
}
OCR1A = 0x01DD;
OCR1B = 0x01CF;

rozsah = horni_hranice-spodni_hranice;
prirustek = rozsah /(pocet_barev-1);

for (j=0; j<10; j++) //zjistovani barev
{
    for (i=0; i<10; i++)
    {
        if(pole[i][j] < (spodni_hranice + prirustek))
        {
            pole_barev[i][j]=0;
        }
        else if((pole[i][j] > (spodni_hranice + (prirustek)))&&(pole[i][j] < (spodni_hranice + (2*prirustek))))
        {
            pole_barev[i][j]=1;
        }
        else if((pole[i][j] > (spodni_hranice + (2*prirustek)))&&(pole[i][j] < (spodni_hranice + (3*prirustek))))
        {
            pole_barev[i][j]=2;
        }
        else if((pole[i][j] > (spodni_hranice + (3*prirustek)))&&(pole[i][j] < (spodni_hranice + (4*prirustek))))
        {
            pole_barev[i][j]=3;
        }
        else if((pole[i][j] > (spodni_hranice + (4*prirustek)))&&(pole[i][j] < (spodni_hranice + (5*prirustek))))
        {
            pole_barev[i][j]=4;
        }
        else if((pole[i][j] > (spodni_hranice + (5*prirustek)))&&(pole[i][j] < (spodni_hranice + (6*prirustek))))
        {
            pole_barev[i][j]=5;
        }
    }
}

```

```
}
else if((pole[i][j] > (spodni_hranice + (6*prirustek))&&(pole[i][j] < (spodni_hranice + (7*prirustek))))
{
    pole_barev[i][j]=6;
}
else if((pole[i][j] > (spodni_hranice + (7*prirustek))&&(pole[i][j] < (spodni_hranice + (8*prirustek))))
{
    pole_barev[i][j]=7;
}
else if((pole[i][j] > (spodni_hranice + (8*prirustek))&&(pole[i][j] < (spodni_hranice + (9*prirustek))))
{
    pole_barev[i][j]=8;
}
else
{
    pole_barev[i][j]=9;
}
}
}
tlacitko1=0;
tlacitko2=2;
}}}
```