

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

MINIATURNÍ MEŘICÍ SYSTÉM PRO MĚŘENÍ RYCHLOSTI VĚTRU

THE MINIATURE WIND SPEED MEASURING DEVICE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

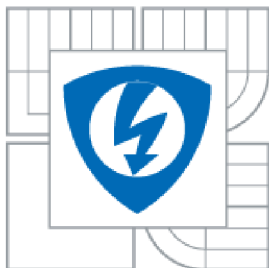
AUTHOR

MICHAL ŠTĚPÁNEK

BRNO 2011



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ**  
**ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

**MINIATURNÍ MĚŘICÍ SYSTÉM PRO MĚŘENÍ RYCHLOSTI VĚTRU**  
THE MINIATURE WIND SPEED MEASURING DEVICE

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**  
BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

Michal Štěpánek

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

Ing. Tomáš Urbanec, Ph.D.

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
Elektronika a sdělovací technika

**Student:** Michal Štěpánek

**ID:** 109731

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2010/2011

**NÁZEV TÉMATU:**

## Miniaturní měřicí systém pro měření rychlosti větru.

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

Seznamte se s principy elektronického měření rychlosti větru. Navrhněte schéma zapojení s ohledem na maximální miniaturizaci a minimalizaci spotřeby. Zohledněte činnost měření v širokém rozsahu tlaků a teplot. Vytvořte desku plošných spojů. Komunikaci zařízení s okolím realizujte pomocí sběrnice I2C, diagnostiku pomocí sériové linky.

Realizujte měřič rychlosti větru. Vytvořte základní obslužný software a měřením získejte kalibrační funkce pro rychlost, teplotu a tlak měřeného média. Vyhodnoťte vlastnosti získaného měřiče.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

[1] DOSEDĚL, M. Elektronické měření rychlosti proudění plynů. Brno: FEKT VUT v Brně, 2005. 21 s.

[2] HYGAR, K. Elektronický anemometr. Amatérské rádio, 1989, roč.38, č.7, s252-255. ISSN 0322-9572

[3] DAŘA, P. Realizace měřiče rychlosti větru s aktivní regulační smyčkou. Brno: FEKT VUT v Brně, 2007. 61 s.

**Termín zadání:** 7.2.2011

**Termín odevzdání:** 27.5.2011

**Vedoucí práce:** Ing. Tomáš Urbanec, Ph.D.

**prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida**

*Předseda oborové rady*

**UPOZORNĚNÍ:**

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

---

## Prohlášení

Jako autor bakalářské práce na téma „Miniaturní měřicí systém pro měření rychlosti větru“ dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne .....

.....  
podpis autora

## Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Tomáši Urbancovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne .....

.....  
podpis autora



ŠTĚPÁNEK, M. *Miniaturní měřicí systém pro měření rychlosti větru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2011. 49 s. Bakalářská práce.  
Vedoucí práce: Ing. Tomáš Urbanec, Ph.D.

## **ABSTRAKT**

Tato práce je rozbohem tematiky teplotního anemometru, jeho návrhem a samotnou realizací.

K měření rychlosti větru při této metodě není použito žádných mechanických pohyblivých částí. K měření rychlosti je použito dvou termistorů. Jeden z nich měří teplotu vzduchu, která je důležitá pro kompenzaci celého systému. Na druhém je elektronicky udržována o konstantu vyšší teplota, než je teplota okolní. Proudící vzduch toto čidlo ochlazuje a tím nutí systém k dodání většího množství tepla. Vyhodnocením množství dodaného tepla dostaneme údaj pro výpočet rychlosti proudícího vzduchu.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Anemometr, rychlost větru, pulzní šířková modulace, mikrokontrolér, tlak vzduchu

## **ABSTRACT**

This thesis is analysis of thermal anemometer, which contains design and realization.

For measuring wind speed there are not used any mechanical moving parts in this way. This measuring uses two thermistors. One of these measures temperature of air, which is very important for compensation of whole system. Temperature of second thermistor is kept on constant value. This value is higher than surrounding air temperature about constant difference. Fluctuant air cools this sensor and because of that systém must supply more of heat. By analysis of value of supplied heat, we can calculate the wind speed value.

## **KEYWORDS**

Anemometer, wind speed, pulse width modulation, microcontroller, air pressure

# Obsah

Úvod.....	8
<b>1 Teplotní anemometr .....</b>	<b>9</b>
1.1 Princip termálního anemometru .....	9
1.2 Teplotní čidla.....	9
1.3 Aktivní regulační smyčka.....	9
1.4 Čidlo atmosférického tlaku .....	10
<b>2 Návrh vlastního obvodu.....</b>	<b>11</b>
2.1 Funkce obvodu .....	11
2.2 Mikrokontrolér .....	12
2.3 Vyhřívání „hot“ čidlo .....	12
2.4 Kompenzační „cold“ čidlo .....	13
2.5 Měnič napětí .....	13
2.6 Kalibrace měřiče.....	15
<b>3 Realizace měřiče .....</b>	<b>16</b>
3.1 Blokové schéma .....	16
3.2 Mikrokontrolér Atmega8.....	16
3.2.1 Použití A/D převodníku.....	17
3.2.2 Výpočty teplot z čidel KTY83-121 .....	17
3.2.3 Komunikace pomocí UART.....	19
3.2.4 Komunikace pomocí I2C.....	19
3.3 Vyhřívání čidla.....	20
<b>4 Konstrukce měřiče .....</b>	<b>22</b>
4.1 Deska plošných spojů.....	22
4.2 Schéma zapojení.....	23
4.3 Popis funkce zapojení.....	24
4.4 Seznam použitých součástek .....	25
<b>5 Programové řešení.....</b>	<b>26</b>
5.1 Řídící registry .....	26
5.2 Výpočty a funkce v programu .....	29

5.2.1	Kompenzační čidlo.....	29
5.2.2	Tlakové čidlo.....	31
5.2.3	Vyhřívané čidlo.....	33
5.2.4	Kompenzace teploty.....	36
5.2.5	Rychlost větru.....	37
5.3	Základní obslužný software.....	40
<b>Závěr.....</b>		<b>43</b>
<b>Seznam zkratk a symbolů.....</b>		<b>44</b>
<b>Seznam tabulek.....</b>		<b>45</b>
<b>Seznam obrázků.....</b>		<b>46</b>
<b>Seznam příloh.....</b>		<b>47</b>

# Úvod

Systémy pro měření rychlosti větru se dají použít v širokém spektru odvětví k nejrůznějším aplikacím. Nejčastěji se využívají pro meteorologické měření, ale použití nachází také při měření rychlosti pohybujících se objektů. Svá uplatnění nachází i v průmyslu.

Mezi doplňkové funkce navrhovaného měřiče je zahrnuto také měření atmosférického tlaku a snímání teploty proudícího vzduchu. Z toho plyne, že tento měřicí systém najde konečné uplatnění v užším směru využití. Půjde například o meteorologické měření, měřicí systém v letadle nebo jiné podobné aplikace.

Měření rychlosti větru lze provádět více metodami. Každá z nich má jistě své výhody i nevýhody a ne každá je použitelná ve všech aplikacích. K nejčastěji používaným metodám, jak rychlost větru měřit, patří mechanické systémy s rotující lopatkovou vrtulkou, laserové měření využívající Dopplerova jevu, systémy s Pitotovou trubicí, ultrazvukové nebo teplotní měření.

Námi navrhovaný systém využívá poslední zmíněný princip teplotního měření. Díky své univerzálnosti a relativní přesnosti můžeme dosáhnout dobrých výsledků a při použití mikrokontroléru pouhou změnou řídicích parametrů přizpůsobit celý systém na konkrétní měření při daných podmínkách. Samotný systém měření obsahuje i senzor teploty, která je zároveň jedna z požadovaných výstupních parametrů měřiče.

Součástí práce je návrh obvodového řešení a samotná realizace s ohledem na miniaturizaci a minimalizaci spotřeby. Dále pak ověření a kalibrace sestrojeného měřiče a vytvoření základního softwaru pro obsluhu.

# 1 Teplotní anemometr

Tento typ anemometru využívá závislost míry ochlazení vyhřívaného prvku proudícím vzduchem a jeho samotné rychlosti. Jeho využití sahá do širokého spektra odvětví. Teplotní měření přináší řadu výhod od malé velikosti měřiče, systémovou variabilitu, až po cenovou dostupnost.

## 1.1 Princip termálního anemometru

Princip termálního (teplotního) anemometru spočívá ve vyhodnocování závislosti teploty elektronicky vyhřívaného prvku a rychlosti vzduchu, který tento prvek ochlazuje. Tato výsledná teplota je závislá na rychlosti proudícího média ale i na dalších vlastnostech jako je teplota nebo vlhkost. Hlavním parazitním faktorem pro nás bude teplota, která měření ovlivňuje nejvíce.

V této práci je využíváno typu měření se stálým udržováním konstantní teploty vyhřívaného čidla, čímž se při změně rychlosti proudění vzduchu mění vyhřívací proud čidla. Tento vyhřívací proud bude realizován širkově modulovaným signálem PWM (Pulse Width Modulation). Tato metoda měření se jinak označuje jako CTA (Constant Temperature Anemometer).

V praxi se využívá i druhé metody označované CCA (Constant Current Anemometer), kde je udržován konstantní proud vyhřívaným čidlem, na kterém je pak měřen úbytek napětí.

## 1.2 Teplotní čidla

Jako čidla pro námi navrhovaný měřič jsme zvolili dostupné monokrystalické senzory s pozitivním teplotním koeficientem. Oproti klasickým termistorům PTC nebo NTC mají řadu výhod jako je například lepší linearita, téměř konstantní teplotní součinitel odporu v celém rozsahu teplot, dlouhodobá stabilita nebo téměř všesměrová charakteristika díky válcovému pouzdru.

V profesionálních aplikacích se využívá jako vyhřívaných čidel tzv. hot-wire nebo hot-film, což jsou velmi malé drátky nebo plíšky ze speciálních odporových materiálů, které jsou velmi přesné ale i velmi drahé a křehké.

## 1.3 Aktivní regulační smyčka

Pokud při měření dochází k rychlým změnám rychlosti proudícího vzduchu. Vyhřívané čidlo nestačí z důvodu velké teplotní setrvačnosti na tyto změny reagovat a nemusí je vůbec zaznamenat.

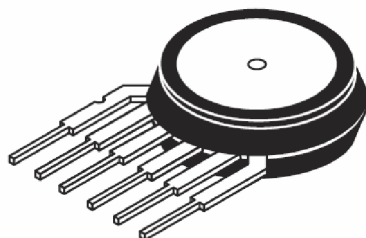
Proto zavádíme tzv. aktivní regulační smyčku. Jde o to, aby mikrokontrolér pomocí vhodného programu pomohl rychleji stabilizovat potřebnou teplotu vyhřívaného čidla změnou střídavy PWM signálu, čímž čidlo dodatečně zahřeje nebo ochladí.

## 1.4 Čidlo atmosférického tlaku

Jeden z dalších požadavků na navrhovaný měřicí systém je schopnost měření hodnoty atmosférického tlaku. Pro tento účel použijeme integrovaný senzor MPX4115 firmy Motorola (později Freescale), který v naší aplikaci bohatě splní účel (obr. 1). Jeho zapojení je velmi jednoduché a nevyžaduje téměř žádné obvodové navrhování. Jedinou podmínkou je potřebné napájecí napětí 5V. Jelikož je celé zařízení napájeno napětím 3,3V, je nutné potřebného napětí 5V pro tlakové čidlo dosáhnout přídavným zdrojem. Takový zdroj lze vytvořit samostatným zvyšujícím měničem nebo lze využít integrovaného stabilizátoru napětí napájeného z měniče, který bude vytvářet vyšší napětí (asi 16V) pro vyhřívané čidlo. Z důvodu minimalizace spotřeby je však vhodné použít kvalitnější stabilizátor s malým úbytkem napětí – nízkým ztrátovým výkonem. (V našem případě stabilizátor LE50DC). Stabilizátor nebude pracovat kontinuálně. Bude spínán ve zvolené četnosti (např. 1s, 10s) na dobu potřebnou jen pro změření hodnoty tlaku. Pro úlohu zapínání a vypínání využijeme jeho vývodu INHIBIT, který je k tomuto účelu určený.

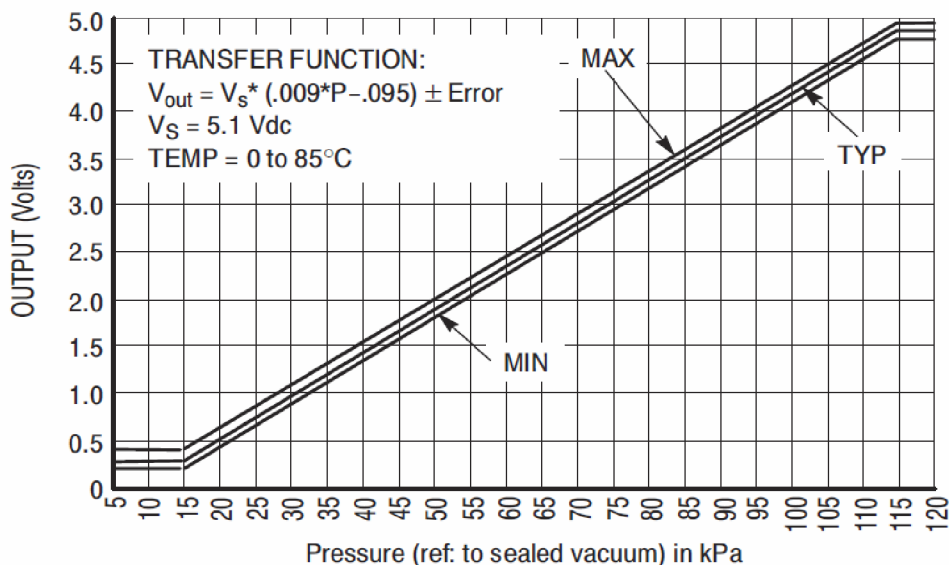
Analogové výstupní napětí tlakového čidla se mění v závislosti na tlaku dle dané katalogové závislosti (obr. 2). Toto napětí bude dále přes odporový dělič měřeno na A/D převodníku mikrokontroléru a poté pomocí katalogových závislostí přepočítána zpět na hodnotu tlaku.

Z katalogového listu senzoru lze také vyčíst závislost chyby měření na teplotě měření. V teplotách pod 0°C se chyba měření lineárně zvětšuje, což je nutné akceptovat při měření v těchto mezních teplotách.



**MPX4115A**

**Obr.1** Integrované tlakové čidlo



**Obr.2** Závislost výstupního napětí na absolutní hodnotě tlaku

## 2 Návrh vlastního obvodu

### 2.1 Funkce obvodu

Zařízení je možné realizovat pouze i s jedním teplotním čidlem, které by střídavě měřilo teplotu vzduchu a rychlost proudění. Tyto režimy by byly na čidle přepínány, což klade nároky na použité čidlo. Jelikož teplotní setrvačnost běžných termistorů ve vzduchu je zhruba 10s (dané konstrukcí – materiály), je tato metoda z důvodu pomalých přechodů téměř nesmyslná. Proto se v návrhu měřiče využije metody se dvěma čidly.

Při této metodě je využito dvou čidel, která nezávisle na sobě vykonávají svou úlohu. Kompenzační čidlo, označované jako „cold“ měří teplotu vzduchu a druhé, vyhřívané čidlo „hot“ měří rychlost proudícího vzduchu pomocí vhodných algoritmů použitých v mikrokontroléru.

Při použití měření s udržováním konstantní teploty (CTA) se pomocí PWM na vyhřívaném čidle udržuje konstantní teplota a údaj o napětí a tudíž i odporu čidla měříme v proudových mezerách pomocí měřícího děliče na A/D převodníku mikrokontroléru. Kompenzační čidlo poskytuje mikrokontroléru údaj pro úpravu výpočtu při různých teplotách měření.

Vyhřívané čidlo je potřeba zahřát na dostatečnou teplotu, aby z hodnot bylo možné přesně vypočítat rychlost vzduchu. Tato teplota musí být samozřejmě vždy vyšší, než je teplota proudícího vzduchu, aby bylo možné vyhodnotit míru ochlazení čidla proudícím vzduchem. V našem případě budeme uvažovat vyhřívání na teplotu o určitou konstantu vyšší



než je teplota měřeného vzduchu. Zvolený teplotní rozdíl čidel je možný měnit při finálním ladění programu mikrokontroléru a dosáhnout tím optimálních výsledků.

Vyhřívání čidla realizujeme pomocí šířkově modulovaného signálu PWM pomocí funkce časovače uvnitř mikrokontroléru. Tento PWM signál vyvedený na určený pin obvodu bude budít tranzistor spínající napětí z měniče na vyhřívání termistor. Změnou středy PWM pak můžeme regulovat efektivní hodnotu proudu čidlem, čímž získáme kontrolu nad jeho teplotou.

Zpětnou analýzou PWM signálu můžeme dopočítat pomocí potřebných závislostí, kolik tepla jsme museli dodat vyhřívánímu čidlu, aby se jeho teplota při ochlazování proudícím vzduchem, dostala na požadovanou hodnotu, o konstantu vyšší než je teplota proudícího vzduchu.

## 2.2 Mikrokontrolér

Použití mikrokontrolérů v elektronice je v dnešní době stále častější řešení. Ovládání a řízení elektronických zařízení mikrokontrolérem rozvíjí mnohé jeho možnosti, nabízí další možné rozšíření a funkce, podporuje komunikaci s jinými zařízeními atd. Jednoduchým zásahem do programu bez fyzických úprav obvodu, je možné vylepšení, popř. doladění řídicího programu, což je v některých aplikacích značným přínosem.

Srdcem našeho měřícího systému je mikrokontrolér Atmega8 z rodiny AVR. Jde o 8bitový počítač typu RISC (s redukovanou instrukční sadou) s harvardskou architekturou od firmy Atmel.

## 2.3 Vyhřívání „hot“ čidlo

Důležitým požadavkem na zvolené čidlo jsou jeho vlastnosti při samotném vyhřívání. Rychlost přechodů mezi teplotami, což prakticky znamená rychlost reakce, je dána fyzickým provedením pouzdra daného čidla. V první řadě jde o velikost a použité materiály. Další důležitý požadavek je téměř všesměrová měřící charakteristika. Té není zcela jednoduché dosáhnout, ale při použití čidla s malým válcovitým pouzdem docílíme takové směrovosti alespoň v jedné rovině. Vzhledem k velikosti a tvaru pouzdra nemusíme rychlost proudění z jiných směrů vyhodnocovat jako totálně chybné ale samozřejmě jako méně přesné ano.

Zařízení je uzpůsobeno na bateriové (popř. akumulátorové) napájení s hodnotou napětí 3,3V, což musíme zohlednit v samotném obvodu. Hodnota odporu čidla by při vyhřívání tak malým napětím musela být relativně malá. S hodnotami odporů běžných dostupných termistorů to ani není možné. Proto musí být celý obvod doplněn o stejnosměrný měnič, který potřebnou hodnotu napětí vytvoří. Při pracovním rozsahu zhruba -30 až 50°C je třeba počítat s mezními hodnotami a příslušnou rezervou.

Pro naše zapojení byl vybrán monokrystalický křemíkový senzor KTY83-121 s nominální hodnotou  $990\Omega$  (při  $25^{\circ}\text{C}$ ) v pouzdře typu SOD68 (DO-34). Tento senzor je použit i jako kompenzační čidlo. Jeho kladný teplotní koeficient se v celém teplotním rozsahu mění velmi málo, čímž je dána i jeho dobrá linearita. Díky velikosti a parametrům je velikost proudu, která ho začíná ohřívat už na hodnotě asi 2mA. Do této hodnoty lze pak bezpečně použít tento senzor pro měření teploty jako je tomu u kompenzačního čidla.

## 2.4 Kompenzační „cold“ čidlo

Kompenzační čidlo slouží k měření teploty proudícího vzduchu. Tato teplota bude jedním z výstupních údajů, ale také bude důležitou hodnotou pro určování potřebné teploty vyhřívaného čidla. Jak už bylo řečeno, je k tomuto účelu použit stejný monokrystalický senzor KTY83-121 jako je tomu u vyhřívaného čidla.

Tento měřicí senzor bude v obvodě zapojen v jednoduchém děliči s rezistorem s pevnou hodnotou odporu. Změnou teploty tak dojde ke změně hodnoty odporu termistoru a tím také ke změně jeho úbytku napětí. Toto napětí lze pak přímo měřit na jednom z A/D převodníků na mikrokontroléru.

Dělič musí být navržen tak aby při nejvyšším napětí (nejvyšší možné teplotě) nepřekročil referenční napětí A/D převodníku, ale aby se zároveň k této hodnotě co nejvíce přibližoval. Tím bude dosaženo nejlepšího využití rozsahu a měřená hodnota tak bude přesnější. Dále je nutné dodržet požadavek bezpečného operačního proudu (asi 2mA) senzorem aby nedocházelo k ohřívání senzoru a tím i měření chybných vyšších hodnot.

## 2.5 Měnič napětí

V našem zapojení musíme brát v úvahu nízké napájecí napětí 3,3V, které by bylo dostačující pro téměř všechny obvodové prvky. Ale vyhřívání čidla na vyšší hodnoty by s tímto malým napětím nebylo vůbec možné. Napájecí napětí požadované tlakovým senzorem je také vyšší, a to konkrétně 5V. Pro vyhřívání senzoru bylo změřeno minimální napětí asi 11V pro ohřev o maximální uvažovanou hodnotu  $50^{\circ}\text{C}$ . Při maximální teplotě měřícího rozsahu asi  $80^{\circ}\text{C}$ , dosahuje senzor odporu, zhruba  $1500\Omega$ . Tento předpoklad velikosti potřebného napětí nezahrnuje rezervu pro aktivní regulační smyčku, ani rezervu pro proudovou mezeru k měření teploty vyhřívaného čidla. Aby vyhřívání senzoru pomocí PWM pracovalo při počítaném teplotním rozdílu teplot čidel  $30^{\circ}\text{C}$  zhruba v polovině rozsahu střídy, bylo přibližným výpočtem určeno napětí se všemi rezervami a to asi 16V.

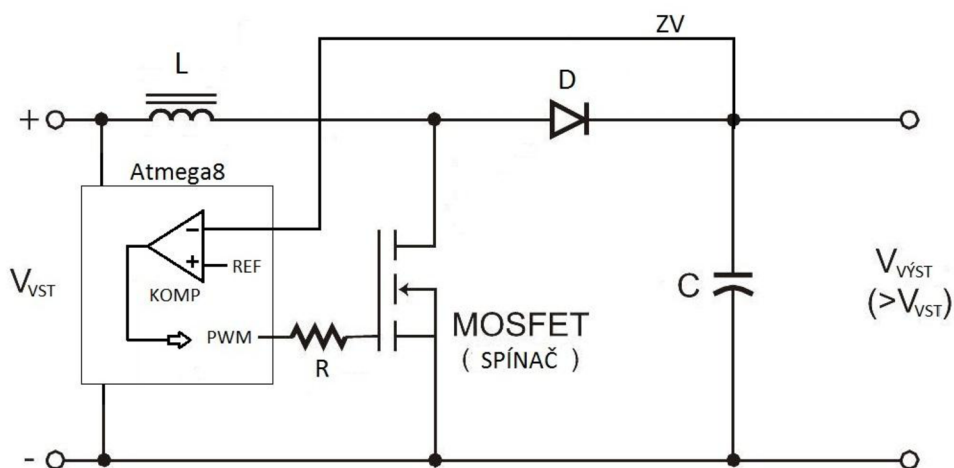
Použitý vzestupný stejnosměrný měnič vyžaduje minimum součástek. O jeho řízení se postará použitý mikrokontrolér. Ten bude budít spínací unipolární tranzistor PWM signálem. Výstupní napětí měniče bude zpětnou vazbou přes přesně spočítaný napěťový dělič přivedeno na komparátor, kde bude srovnáváno s přesnou referenční hodnotou. Podle stavu, jestli je

napětí na komparátoru větší nebo menší než reference, bude zmenšována nebo zvětšována střída PWM řídící spínací tranzistor, a tím stabilizována hodnota výstupního napětí měniče.

Ke generaci PWM je v našem řešení použit 8bitový čítač. To znamená, že maximální kmitočet generovaného PWM signálu bez použité předděličky bude podílem hodinového signálu mikrokontroléru, v našem případě 8MHz, a hodnoty 256. Z toho dostáváme kmitočet 31,25 kHz, což je pro naše použití postačující. Střída ovládaná mikrokontrolérem se tak může měnit ve 256 krocích a regulovat tím výstupní napětí měniče.

Důležitou poznámkou je i to, že při nedostatečně velké zátěži tohoto měniče může jeho napětí vystoupat do nekontrolovaných hodnot, což je dobré ošetřit.

Vzestupný měnič (zvyšující, boost, step-up). Princip je založen na akumulaci proudu v tlumivce, který po rozepnutí spínače nezaniká, ale teče dále stejným směrem, dokud se nedokončí přechodný děj a energie uložená v tlumivce se neodevzdá do okolí. Principiální schéma je na obr 3.



**Obr.3** Principiální schéma použitého vzestupného měniče

Návrh samotného měniče. Z teoretického rozboru v literaturách, můžeme použít výchozí vztah, která vyplývá z rovnosti napěťových ploch u průběhů charakteristických pro vzestupný měnič.

$$U_1 \cdot \delta T = (U_o - U_1)(1 - \delta)T \quad [V; ;s]. \quad (1)$$

Kde  $U_1$  je vstupní napájecí napětí,  $U_o$  je výstupní napětí měniče,  $T$  je perioda budícího signálu a  $\delta$  je jeho střída, která je poměrem doby trvání vysoké úrovně a délky celé periody. Odtud můžeme získat zjednodušený vztah, ze kterého dále získáme výpočet potřebné střidy pro dosažení potřebného výstupního napětí. Konkrétní hodnotu můžeme spočítat, ale použijeme ji nejvýše jako výchozí hodnotu v programu. Potřebnou hodnotu si mikrokontrolér bude počítat sám podle stavu analogového komparátoru.

$$U_o = U_1 \cdot \frac{1}{1-\delta} \quad [\text{V};-]. \quad (2)$$

$$\delta = 1 - \frac{U_1}{U_o} \quad [-; \text{V}]. \quad (3)$$

$$\delta = 1 - \frac{3,3}{16} = 0,794$$

Potřebným údajem pro dimenzování je maximální proud tranzistorem.

$$I_{Tmax} = \frac{U_1 \cdot \delta T}{L} \quad [\text{A}; \text{V}; \text{s}; \text{S}] \quad (4)$$

Perioda budícího PWM signálu T se určí z hodinové frekvence kontroléru a použitého 8bitového čítače. Žádná předdělička není nastavena, takže jedna perioda PWM bude vytvořena 256 periodami hodinového signálu, který je generován interním RC oscilátorem na hodnotě 8Mhz. Indukčnost tlumivky je 220μH. Dosazením do vzorce dostaneme:

$$I_{Tmax} = \frac{3,3 \cdot 0,794 \cdot \frac{256}{8000000}}{0,00022} \cong 0,38 \text{A}$$

Tranzistor bude spínán přes rezistor mikrokontrolérem, na kterém může být maximálně napájecí napětí a to 3,3V. Proto použitý tranzistor musí mít prahové napětí (threshold voltage) minimálně na této hodnotě, lépe však pod ní. Maximální závěrné napětí bude dáno součtem výstupního napětí a úbytkového napětí na diodě.

Jako vhodným tranzistorem byl vybrán spínací MOSFET tranzistor IRL2705, který splňuje všechny kladené nároky i s rezervou.

Tlumivka byla vybrána s ohledem na pracovní podmínky a malé rozměry. Její hodnota je 220μH. Velikost indukčnosti ovlivní výsledné zvlnění proudu diodou. Pro naše použití je optimální volbou mezi velikostí a parametry.

Filtrační kondenzátor vyhlazuje výsledné výstupní napětí. Jelikož s použitím PWM řízení měniče nedosáhneme při taktu jádra 8MHz většího kmitočtu než PWM než 31,25kHz, je hodnota kondenzátoru důležitá pro stabilizaci měření. Samozřejmě musí být kondenzátor dimenzován na použité napětí z výstupu měniče. Po měření a experimentech byl na pozici usazen elektrolytický kondenzátor o kapacitě 220μF s mezním napětím 25V. Lepších výsledků by se dosáhlo dalším zvýšením kapacity nebo zmíněnou úpravou spínacího signálu.

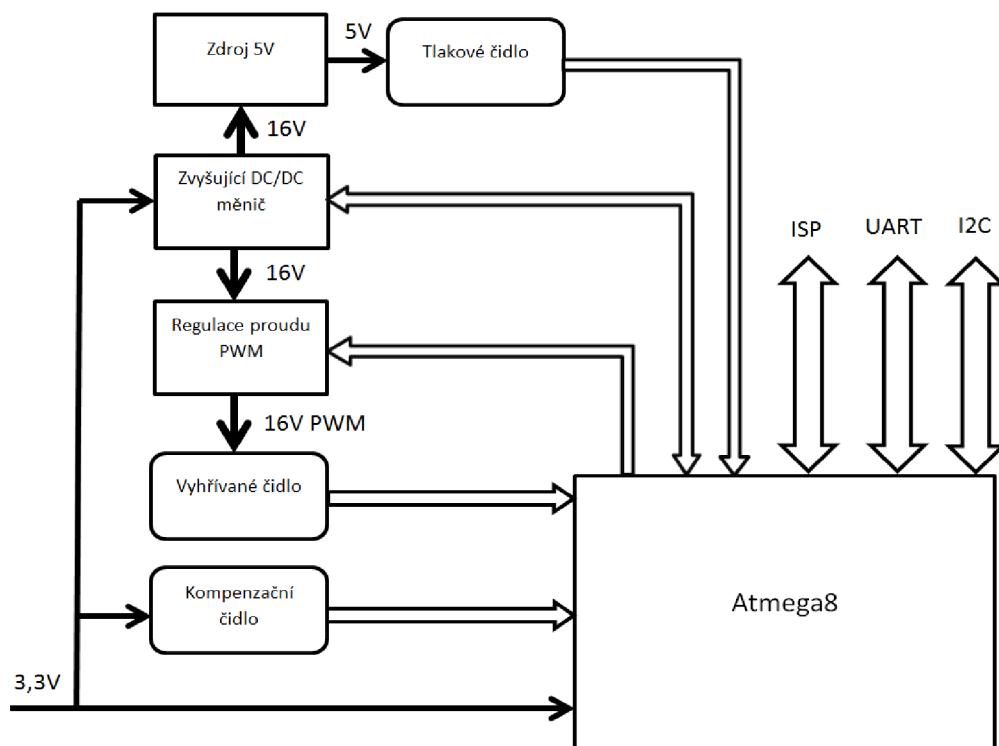
## 2.6 Kalibrace měřiče

Důležitá součást návrhu měřiče je jeho kalibrace. Použití mikrokontroléru tuto kalibraci značně ulehčí. Samotná kalibrace se provede pouhým zásahem do programu mikrokontroléru. Díky implementaci jazyka C do programování, bude řada věcí velice usnadněna.

Kalibrace je nutná až po sestavení fyzického měřiče a pečlivém změřením všech potřebných závislostí. Správné nastavení všech dílčích hodnot může mít velký vliv na přesnost celého přístroje. Kalibrace měřených veličin se provede na dokončeném zhotoveném měřiči tak, že srovnáme naměřené hodnoty s přesnějším referenčním měřičem, odtud dostaneme kalibrační křivku, kterou pak zaimplementujeme do výpočtových funkcí.

### 3 Realizace měřiče

#### 3.1 Blokové schéma



**Obr.4** Zjednodušené blokové schéma měřiče

#### 3.2 Mikrokontrolér Atmega8

Mikrokontrolér je v našem zapojení použit pro řízení měniče, převodu analogových hodnot z obou teplotních čidel i tlakového senzoru, komunikaci s okolím po sériové lince a I2C sběrnici a samozřejmě ke všem příslušným výpočtům.

Použitý 8bitový model Atmega8 z rodiny AVR disponuje řadou periferií, funkcí a usnadnění, které nám pomohou v realizaci navrhovaného měřiče. Mezi součásti tohoto mikrokontroléru, které se nám budou bezesporu hodit, patří: 10bitový A/D převodník,

časovače s možností generace PWM signálu, I/O porty, sériová linka, I2C komunikace nebo třeba rozhraní ISP pro přímé programování v sestaveném obvodu.

### 3.2.1 Použití A/D převodníku

V našem zapojení je nevyhnutelné měření analogových úrovní některých napětí. Námí vybraný mikrokontrolér Atmega8 disponuje 10bitovým převodníkem s přepínatelným vstupem. Ke správné funkci tohoto převodníku musíme provést patřičné programové nastavení příslušných řídicích registrů. Referenční úroveň převodníku se nastavuje v registru ADMUX. Pro všechna naše měření tomu bude vnitřní reference 2,56V. Tím je dána maximální možná identifikovatelná úroveň napětí a tedy i maximální rozlišovací schopnost převodu. Všechna měřená napětí jsou před vstupem na vývody kontroléru snížena patřičnými děliči, aby nikdy nepřesáhly referenční hladinu, nebo v případě vyhřívaného čidla, vyšším napětím nepoškodili mikrokontrolér.

Dalšími důležitými parametry převodu jsou kmitočet vzorkování daný předděličkou a hodinovým kmitočtem, zarovnání výsledku v registru, využití přerušení a spouštění převodu.

Detailní popis významu jednotlivých bitů řídicích registrů lze bez problému dohledat v katalogovém listě mikrokontroléru, který lze najít např. na stránkách výrobce.

Výsledek A/D převodu je ukládán do dvou registrů, do registru ADCL byte nižší a do ADCH byte vyšší. Tuto dvojici lze v programu číst jako celé slovo ADC popř. ADCW a její hodnota bude dána vztahem

$$ADC = \frac{U_{IN}}{U_{REF}} \cdot (2^n - 1) \quad [-; V; -] \quad (5)$$

Kde  $U_{IN}$  je vstupní měřené napětí,  $U_{REF}$  je referenční napětí a  $n$  je rozlišení převodníku (tj. 10 pro 10bitový převodník).

Z tohoto vztahu není problém vyjádřit vstupní napětí a spočítat jej z hodnot uložených v registrech ADC.

$$U_{IN} = \frac{ADC \cdot U_{REF}}{1023} \quad [V; -; V] \quad (6)$$

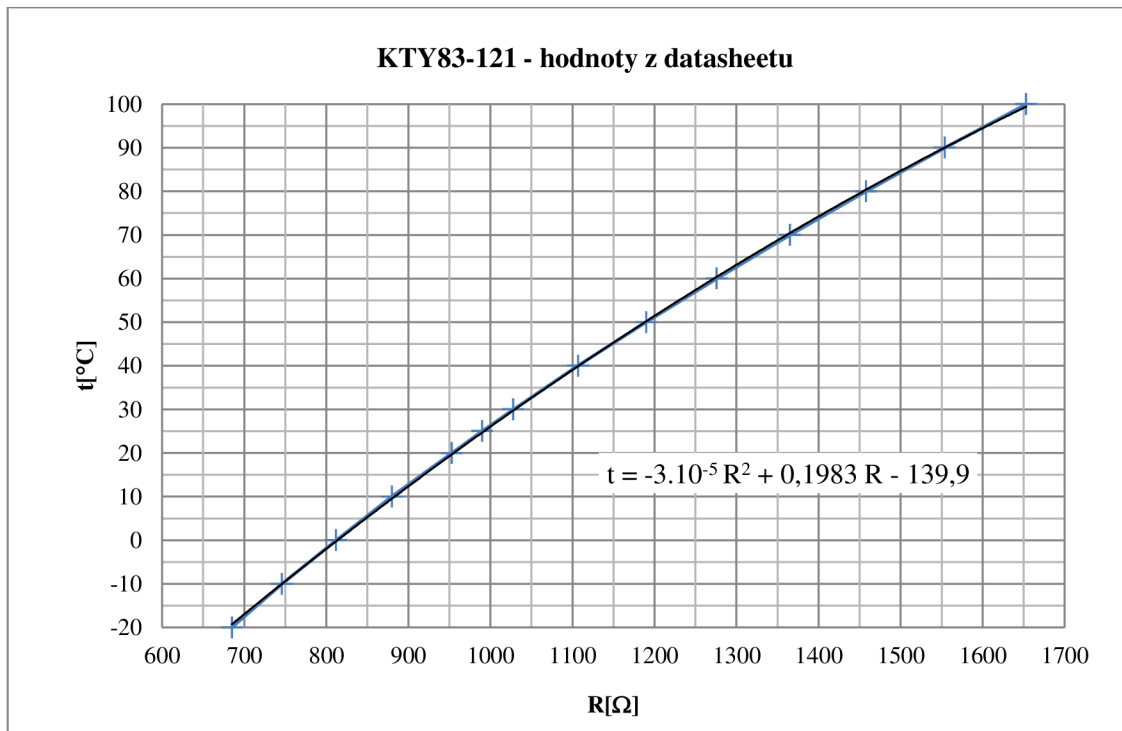
Pro nadlimitní hodnoty, které se vymykají předpokladům a poznatkům je možné vyhodnotit stav jako nepřipojené čidlo a podobně. Takto je realizována jednoduchá diagnostická funkce, kterou obvod může zprostředkovat uživateli např. přes sériovou linku.

### 3.2.2 Výpočty teplot z čidel KTY83-121

Zmíněný monokrystalický senzor je přesně popsán výrobcem. Z jeho katalogového listu je možné snadno z tabulek a průběhů odečíst hodnoty odporu pro dílčí teploty a sestavit aproximační funkci. Tato funkce poslouží pro výpočty teplot uvnitř mikrokontroléru.

Obě čidla jsou typu **KTY83-121** PTC  $R_{25}=990\Omega$  (Philips Semiconductors).

Závislost odporu na teplotě senzoru proložená aproximační funkcí druhého řádu.



**Obr.5** Teplotní závislost odporu čidla

Studený kompenzační termistor je zapojen v jednoduchém děliči napětí, odkud napětí přes dolní propust směřuje přímo na A/D převodník. Dělič je napájen napětím 3,3V a je sestaven z rezistoru s hodnotou 2,7kΩ a samotného senzoru. Napětí na děliči a tím i napětí na A/D převodníku bude dáno vztahem

$$U_{KOMP} = \frac{R_{KOMP}}{R_1 + R_{KOMP}} \cdot U_n \quad [V; \Omega; V] \quad (7)$$

Kde  $U_{KOMP}$  je napětí na kompenzačním čidle (napětí na A/D převodníku),  $R_1$  je pomocný rezistor,  $R_{KOMP}$  je odpor čidla daný teplotou a  $U_n$  je napájecí napětí děliče.

Pokud do vztahu za  $R_{KOMP}$  dosadíme funkci z teplotní závislosti, dostaneme vztah pro přímý výpočet napětí na převodníku pomocí teploty. Vyjádřením této teploty a dosazením vztahu (6) pro přepočtení napětí z hodnot v ADC registru pak dostáváme vztah pro výpočet teploty přímo z hodnoty ADC.

$$R_{KOMP} = \frac{R_1 \cdot ADC \cdot U_{REF}}{1023 U_N - ADC \cdot U_{REF}} \quad [\Omega; \Omega; -; V] \quad (8)$$

V programu se výpočet provede postupně pro lepší přehlednost už s konkrétními konstantami, čímž se vztahy zjednoduší.

U vyhřívaného termistoru je tomu podobně. Pomocný rezistor je zde zapojen odpor s hodnotou 10kΩ. Měření teploty na vyhřívaném termistoru musí probíhat za stavu proudové mezery, jinak bychom měřili přímo vyšší napětí z měniče, sepnuté tranzistorem. Za měřícím

děličem následuje další pomocný dělič se zenerovou diodou, která má za funkci svádět proud v době sepnutí tranzistoru, a tím nedovolit připojení vyššího napětí než je bezpečné, na vývod mikrokontroléru. V tomto děliči jsou dva rezistory navrženy tak, aby se napětí na tomto děliči snížilo co nejméně, kvůli zachování přesnější hodnoty, ale zároveň aby při sepnutí tranzistoru neovlivňovaly proud čidlem. Proto byly vybrány hodnoty  $R_{11}$  470k $\Omega$  a  $R_{10}$  27k $\Omega$ . Pro výpočet napětí na děliči můžeme použít vztah (7) s upravenými indexy pro vyhřívané čidlo a nahrazeným indexem pomocného rezistoru za  $R_2$ . Toto napětí spočítané na měřicím děliči bude pak násobeno konstantním převodním poměrem  $p_{bezp}$  druhého bezpečnostního děliče.

$$p_{bezp} = \frac{R_{11}}{R_{11} + R_{10}} \quad [-; \Omega] \quad (9)$$

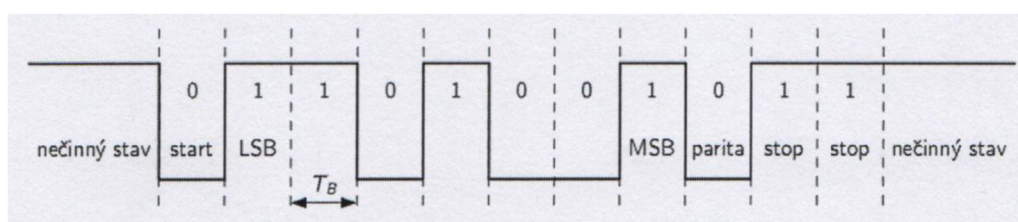
$$p_{bezp} = \frac{470 \cdot 10^3}{470 \cdot 10^3 + 27 \cdot 10^3} = 0,94567$$

### 3.2.3 Komunikace pomocí UART

Oba popisované typy komunikací patří do asynchronního přenosu. Vysílač může data posílat v libovolném okamžiku a s libovolně dlouhými pauzami = asynchronně. Hodinový signál přijímače a vysílače musí být synchronizován.

Sériová komunikace je pevně uspořádána do tzv. rámců. Forma rámců se může lišit a je nutné ji předem dohodnout (nastavit) na obou stranách komunikujících zařízení. Stejně tak i rychlost přenosu.

Jeden rámec je tvořen START bitem v logické nule. Následuje 5 až 9 datových bitů v pořadí od LSB k MSB. Poté volitelný paritní bit (sudá / lichá parita). A komunikaci končí 1 až 2 STOP bity v logické jedničce. Nečinný stav sběrnice je pak také v logické 1.



**Obr.6** Průběh sériové komunikace (mód 7E2)

Na průběhu je vidět formát rámce 7E2 (náhodně vybrán pro ukázkou), což představuje 1 START bit, 7 datových bitů, bit sudé parity (E) a 2 STOP bity.

### 3.2.4 Komunikace pomocí I2C

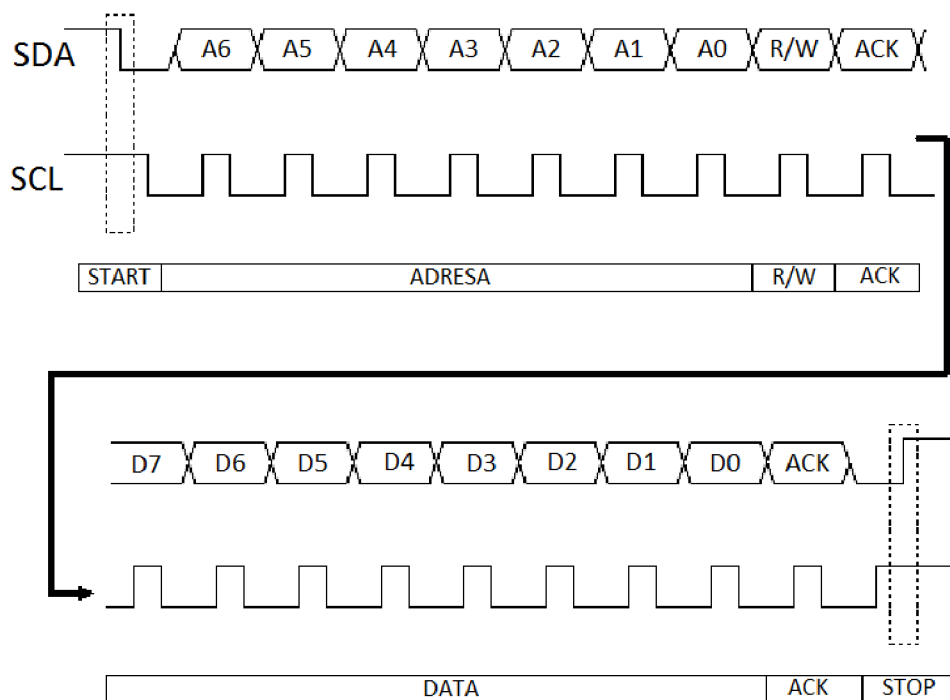
I2C (Inter-Integrated Circuit) je komunikační sběrnice vyvinutá firmou Philips, a využívá se k nízko-rychlostní komunikaci periférií v elektronických zařízeních. Sběrnice



rozděluje zařízení na řídicí (master), která zahajují a ukončují komunikaci a generují na sběrnici hodinový signál a řízené (slave), což je zařízení adresované masterem.

Každá stanice připojená na I2C má přidělenou 7bitovou adresu. Po zachycení podmínky START porovnávají všechny obvody svou adresu s adresou, která je vysílána na sběrnici. I2C Umožňuje připojení až 128 různých zařízení pomocí pouze dvou obousměrných vodičů. Jeden z nich tvoří hodinový signál SCL (Synchronous Clock) a druhý datový kanál SDA (Synchronous Data).

Každý přenos zahajuje vyslání podmínky START, tj. překlopení datové linky z 1 na 0 při současném stavu 1 na lince SCL. Poté je vyslána 7 bitová adresa příjemce a jeden R/W bit, který identifikuje požadovanou operaci (čtení/zápis). Další bit ACK (Acknowledge) je vyslán s úrovní H (log.1), a je určen k potvrzení adresy přijímací stanicí, která při správném přijetí adresy (shodě) bit překlopí. Dál jsou přenášena data ve směru určeném předchozím bitem R/W. Každý byte je následován jedním ACK bitem. Po ukončení přenosu je vyslána podmínka STOP, tj. překlopení datové linky z 0 na 1 při současném stavu 1 na lince SCL.



**Obr. 7** Průběh komunikace na sběrnici I2C

### 3.3 Vyhřívání čidla

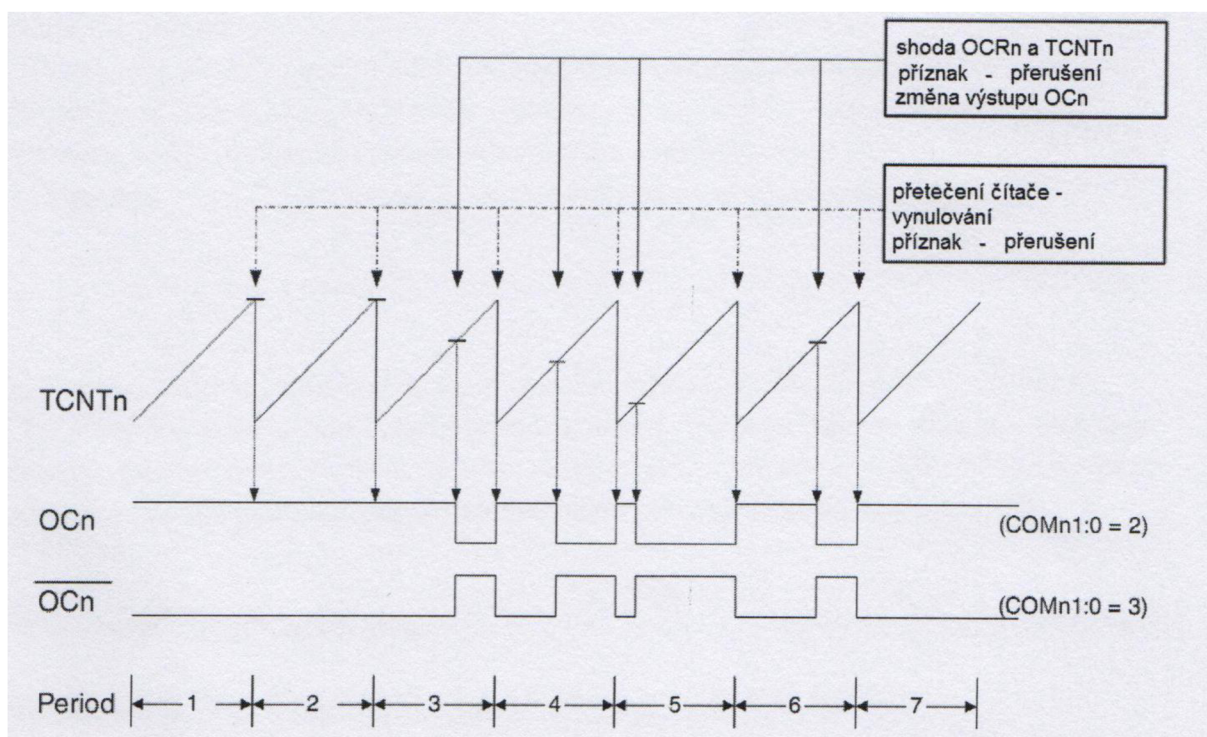
Pro zjištění, o kolik se čidlo zchladilo vlivem působení proudění vzduchu, je potřeba toto čidlo zahřát na určitou teplotu, která bude vyšší než aktuální teplota změřená kompenzačním čidlem. Hodnota tohoto rozdílu musí splňovat řadu požadavků a musí respektovat parametry ohřivaného čidla. Při zahřátí čidla o velký teplotní rozdíl by sice bylo

dosaženo větší přesnosti, ale zároveň tím roste spotřeba celého zařízení. Vyhřívaná teplota také samozřejmě nesmí čidlo zničit. Vlivem toho bude teplotní rozdíl dán kompromisem mezi zmíněnými kritérii a bude určen experimentálně.

Vhodnou metodou, jak měnit efektivní hodnotu proudu ohřívající čidlo, je použití generovaného šířkově modulovaného signálu z interního čítače/časovače mikrokontroléru.

Hodnota čítače TCNTn roste s hodinovým signálem cyklicky od 0 do n (podle zvoleného čítače) a je srovnávána s hodnotou v komparačním registru OCRn. V okamžiku shody obou hodnot je možné měnit úroveň výstupního signálu OCn. Změna hodnoty OCn nastane také při přetečení čítače. Tímto způsobem je dosaženo snadné kontroly nad střídou generovaného PWM signálu, kterým můžeme pomocí spínacího obvodu regulovat efektivní hodnotu proudu čidlem. Je třeba myslet na to, že kmitočet PWM musíme zvolit tak, aby teplotní setrvačnost čidla ještě udržela jeho konstantní teplotu. Zároveň ale nesmí být kmitočet moc velký, abychom v proudové mezeře stihly dokončit příslušné A/D převody.

Pro naše zapojení jsme zvolili režim fast PWM.



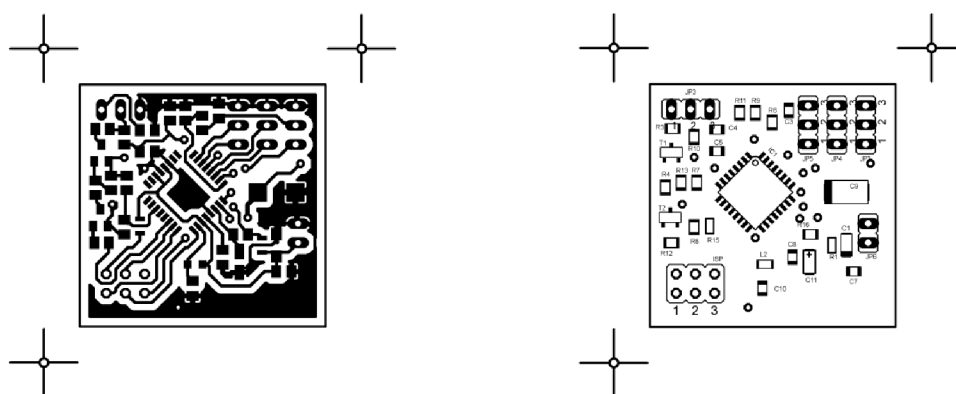
**Obr. 8** Okamžité průběhy signálů čítače/časovače v režimu fast PWM

Ke správné funkci čítače ve zvoleném módu je nutné správné nastavení všech řídicích registrů. Obsah všech těchto registrů a přesný popis jednotlivých bitů je možné dohledat v katalogovém listu mikrokontroléru. Jedná se o registry TIMSK, TIFR, TCCRn. V nichž je třeba nastavit všechny potřebné údaje jako je správný mód, spouštění, generování přerušení, velikost předděličky – kmitočet PWM, reakce na události a podobně.

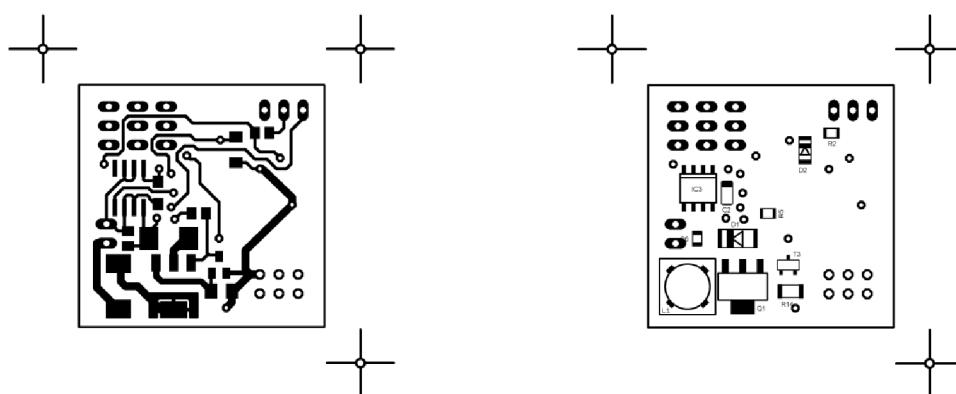
## 4 Konstrukce měřiče

### 4.1 Deska plošných spojů

Dle navrženého schématu, viz obr. 13, byla navržena deska plošných spojů. Návrh byl proveden v programu Eagle. Deska má rozměry 31x31mm a je z obou stran osazena součástkami pro povrchovou montáž SMD.



Obr. 9 DPS a osazovací plán vrstvy TOP (1:1)



Obr. 10 DPS a osazovací plán vrstvy BOTTOM (1:1)



### 4.3 Popis funkce zapojení

Ze schématu jdou vyčíst dílčí úlohy a principy jednotlivých částí obvodu. Napájecí napětí 3,3V je filtrováno tantalovým kondenzátorem o hodnotě 10 $\mu$ F. Na napájecím napětí je také připojen keramický blokovací kondenzátor.

V horní části schématu je měnič napětí. U spínacího MOSFET tranzistoru je ochranný obvod tvořený rezistorem R14 a tranzistorem T3. Při možné elektronické nebo programové chybě, kdyby spínací tranzistor Q1 zůstal sepnutý, pak zvyšování proudu přes rezistor R14 způsobí zvýšení svého úbytku napětí až k hodnotě asi 0,6V, které začne spínat tranzistor T3, čímž se sníží napětí na bráně G tranzistoru Q1, který se tak přivírá a omezuje procházející proud. Simulací tohoto ochranného obvodu v Pspice jsme došli k dostačující hodnotě odporu R14 0,5 $\Omega$  při našem pracovním kmitočtu 31,25kHz. Na výstupu měniče je opět filtrační elektrolytický a blokovací keramický kondenzátor. Za nimi je pak dělič napětí složený z rezistorů R7 a R8 tvořící zpětnou vazbu. Tento dělič je nastaven tak, aby při napětí měniče asi 17V vytvořil napětí 1,3V. Toto napětí je přivedeno na analogový komparátor, kde je srovnáváno s referenčním napětím 1,3V. Při vyšší nebo nižší hodnotě mikrokontrolér upravuje stídu řídicího PWM na vývodu PC0, spínajícího tranzistor Q1.

Zdrojem napětí 5V pro tlakové čidlo MPX4115 je stabilizátor napětí LE50CD, který je napájen z výstupního napětí měniče. Jeho funkce (zapnutí/vypnutí) je ovládána mikrokontrolérem prostřednictvím portu PC1.

Napravo od měniče je měřicí dělič tlakového senzoru. Výstupní analogové napětí tohoto senzoru se může pohybovat v hodnotách od 0 do 5V. Jelikož jako referenční napětí převodníku použijeme vnitřní referenci 2,56V. Je třeba toto výstupní napětí snížit. Snížením napětí na polovinu děličem s poměrem 1:1 pokryjeme celý rozsah maximální rozlišením. Na výstupním napětí senzoru je připojen blokovací kondenzátor o hodnotě 470pF dle katalogového listu.

Napájení A/D převodníku na pinu AVCC je kvůli rušení zapojeno z napájecího napětí přes LC filtr L2 s hodnotou 10 $\mu$ H a C10 s hodnotou 100nF. Na pinu referenčního napětí AREF je také podle katalogového listu mikrokontroléru zapojena kapacita, v našem případě C8 s hodnotou 100nF.

Vývody na rozhraní I2C a UART jsou připojeny na konektory JP4 a JP5. Šesti-pinový programovací konektor ISP je vidět v dolní části schématu.

Pravou část schématu tvoří spínací obvod vyššího napětí do vyhřívaného čidla s měřicím děličem a ochranným obvodem a měřicí dělič pro kompenzační čidlo.

Spínací obvod je dvoustupňový, aby se zabránilo přístupu napětí z měniče na vývod mikrokontroléru, které by ho mohlo zničit. Spínač se spíná s vysokou úrovní z mikrokontroléru. Tato vysoká úroveň sepne první NPN tranzistor T2, čímž sníží napětí na bázi PNP tranzistoru T1, které stačí k jeho otevření. Tímto sepnutím se na čidle objeví napětí

z měniče snižené o malou hodnotu saturačního napětí tranzistoru T1. Báze tranzistoru T2 je přes rezistor R12 řízena PWM signálem z mikrokontroléru, který tímto reguluje vyhřívání čidla. Dále je u spínacího obvodu vidět měřících děličů obou čidel, které byly probrány v kapitole 3.2.2. Obě čidla jsou k obvodu připojeny přes konektor JP3. Obě tyto čidla se pak připojují proti zemi, která je na konektoru JP3 rovněž vyvedena.

#### 4.4 Seznam použitých součástek

Označení	Provedení	Hodnota	Počet
R14	SMD 1206	0.5R	1
R15	SMD 0805	0R	1
R12	SMD 0805	1k	2
R1	SMD 0805	2k7	1
R16	SMD 0805	22k	1
R10	SMD 0805	27k	1
R6, R9	SMD 0805	4k7	2
R3	SMD 0805	5R6	1
R8	SMD 0805	6k2	1
R2, R4, R13	SMD 0805	10k	3
R7	SMD 0805	75k	1
R11	SMD 0805	470k	1
R5	SMD 0805	180R	1
L2	2012C	10u	1
L1	DR74	220uH	1
C4, C6, C7, C8, C10	SMD 0805	100n	5
C3	SMD 0805	470p	1
C5	SMD 0805	10n	1
C1, C2	SMD vel.A	10u	2
C9	SMD vel.C	220u	1
C11	SMD 3216	2u2	1
D2	SOD80C	zen. 3V3	1
D1	MELF-MLL41	BAT48	1
T1	SOT23	BC807-16	1
T2, T3	SOT23	BC817	2
Q1	SOT323	IRLL2705	1
IC3	SO8	LE50CD	1
IC1	TQFP	MEGA8-AI	1
JP6	JP1E	kon.1x2	1
JP2, JP3, JP4, JP5	JP2E	kon.1x3	4
ISP	JP3Q	kon. 2x3	1

**Tab. 1** Seznam použitých součástek

V seznamu součástek nejsou zahrnuta teplotní čidla KTY83-121 ani tlakové čidlo MPX4115. Seznam se týká jen součástek osazených na DPS. U čidel se předpokládá připojení k DPS pomocí kabelů.

## 5 Programové řešení

### 5.1 Řídící registry

Pro správnou funkci všech periférií mikrokontroléru je nezbytné správné nastavení v příslušných řídicích registrech. Výchozí nastavení se provádí při programování, další nastavení může pak provádět i samotný program za běhu. V dalším popisu jsou detailně popsány víceméně jen bity řídicích registrů, které je důležité nastavovat, popř. mají zásadní vliv na funkci mikrokontroléru. Další podrobnosti o obsahu těchto registrů je opět možno lehce dohledat v katalogovém listě.

Základním nastavením použitých portů je jejich směrový registr DDRx. U každého použitého vývodu z 8bitového portu (A,B,C..) je třeba nastavit, jestli je použit jako vstupní (log. 0) nebo výstupní (log. 1), a to pro každý pin (vývod) zvlášť. Pro zápis výstupních hodnot do portu při výstupní orientaci se použije registru PORTx, pro čtení z portu při jakékoliv orientaci pak registru PINx. Takhle je vytvořena základní komunikace s I/O porty mikrokontroléru.

Nastavení analogového komparátoru pro zpětnou vazbu měniče provádíme v registru ACSR. Bit 6 zde nastavuje použitou referenci. Volbou (1) aktivujeme interní referenci 1,3V na neinvertující vstup komparátoru. Bit 3 povoluje vyvolání přerušení při události, kterou nastavují bity 0,1. V našem případě volbou (00) je tato událost změna výstupní hodnoty komparátoru.

ACSR

7	6	5	4	3	2	1	0
ACD	ACBG	ACO	ACI	ACIE	ACIC	ACIS1	ACIS0
0	1	0	0	1	0	0	0

Další důležitou částí je A/D převodník. Zde jsou zásadní 2 řídicí registry. První je ADMUX. Bity 7 a 6 s hodnotami (11) v tomto registru nastavují interní referenci převodníku 2,56V. Bit 5 (0) nastaví zarovnání výsledku vpravo ve výstupním dvoj-registru ADC. Bity 0-3 pak nastavují použitý vstup pro převod. V našem případě ADC2 -tlakové čidlo, ADC3 – hot čidlo nebo ADC7 – cold čidlo. Tzn. hodnoty (0010), (0011) nebo (0111).

ADMUX

7	6	5	4	3	2	1	0
REFS1	REFS0	ADLAR	–	MUX3	MUX2	MUX1	MUX0
1	1	0	0	x	x	x	x

Druhým registrem je ADCSRA. Bit 7 (1) zde povoluje (zapíná) A/D převodník. Bit 6 (1) spouští převod. Bit 3 povoluje vyvolání přerušení po dokončeném převodu. A trojice bitů 0-2 nastavují předděličku kmitočtu pro vzorkovací signál. Zde je s našimi hodnotami přijatelná volba (111) tj. dělička 128 =>  $f_{vz} = 62,5\text{kHz}$ , nebo volba (110) tj. dělička 64 =>  $f_{vz} = 125\text{kHz}$ .

ADCSRA

7	6	5	4	3	2	1	0
ADEN	ADSC	ADFR	ADIF	ADIE	ADPS2	ADPS1	ADPS0
1	0	0	0	1	*	*	*

Výstupní převedená hodnota podle vztahu (5) je pak ukládána do dvoj-registru ADC.

16bitový čítač/časovač 1 je použit pro generaci PWM signálu pro vyhřívání čidla. Nastavení se provádí následujícími registry. Registr TCCR1A, kde bity 5,4 nastavují změnu výstupního signálu OC1B na nulu při shodě čítače a komparačního registru OCR1B (neinvertující mód). Bity 0,1 (10) jsou částí pro nastavení příslušného módu výstupu – mód 14. Mód 14 znamená generaci rychlé PWM. Kdy čítač čítá od nuly do námi nastavené hodnoty v registru ICR1 (65536 tj. 0xFFFF). V případě shody s komparačním registrem převrací výstupní hodnotu OC1B na nulu. Při přetečení se výstup OC1B překlopí zpět na jedničku a čítač čítá opět od nuly. Takhle se změnou komparačního registru jednoduše mění střída generovaného PWM signálu.

TCCR1A

7	6	5	4	3	2	1	0
COM1A1	COM1A0	COM1B1	COM1B0	FOC1A	FOC1B	WGM11	WGM10
0	0	1	0	0	0	1	0

Dalším registrem je TCCR1B. Zde bity 4,3 (11) jsou další částí pro nastavení výše zmíněného módu 14. Bity 0-2 (001) nastavují předděličku pro hodinový signál čítače. Volbou (001) je zde nastavena předdělička 1, což znamená, že čítač je řízen základním hodinovým signálem 8MHz. Takhle je pak dosaženo toho, že při jedné periodě PWM signálu, kdy čítač čítá do hodnoty 0xFFFF dostáváme optimální frekvenci PWM 122Hz pro vyhřívání čidla.

TCCR1B

7	6	5	4	3	2	1	0
ICNC1	ICES1	–	WGM13	WGM12	CS12	CS11	CS10
0	0	0	1	1	0	0	1

Registr TIMSK obsahuje další důležité řídicí bity. Bity 7,6 (11) povolují vyvolání přerušení při shodě čítače s komparačním registrem a přerušení při přetečení čítače. To celé se týká čítače/časovače 2. To stejné pro čítač/časovač 1 představují bity 3,2 (11).



TIMSK

7	6	5	4	3	2	1	0
OCIE2	TOIE2	TICIE1	OCIE1A	OCIE1B	TOIE1	–	TOIE0
1	1	0	0	1	1	0	0

Výše zmíněný komparační registr OCR1B slouží pro nastavení hranice překlápění příslušného výstupu OC1B, v programu to znamená změnu šířky generovaného PWM signálů. Stropní hodnotou u čítače/časovače 1 v použitém módu 14 je registr ICR1.

8bitový čítač/časovač 2 je použit pro vytváření PWM signálu pro řízení měniče. Čítač pracuje stejným způsobem jako první zmíněný čítač. Jeho čítání však probíhá v rámci 8 bitů, tzn. 0 až 255 (0xFF). Nastavení bližších údajů provádíme v registru TCCR2. Bity 6,3 (11) zde znamenají generaci rychlé PWM. Bity 5,4 (10) nastavují neinvertující mód (log. 0 při shodě, log. 1 při přetečení). Bity 0-2 (001) nastavují předděličku hodinovému signálu 1. To znamená, že kmitočet generovaného PWM signálu pro měnič bude  $8\text{MHz}/256 = 31,25\text{kHz}$ . Větší kmitočet se s použitím čítače a jeho generátoru PWM při našem hodinovém signálu 8MHz nedá vytvořit.

TCCR2

7	6	5	4	3	2	1	0
FOC2	WGM20	COM21	COM20	WGM21	CS22	CS21	CS20
0	1	1	0	1	0	0	1

Komparačním registrem pro nastavení střídy PWM je OCR2.

Nastavení sériové linky provedeme v následujících registrech. Prvně je třeba spočítat hodnotu, kterou zapíšeme do registru UBRR. Toto nastavení bude mít za úkol synchronizaci symbolových rychlostí. Pro komunikaci jsme zvolili rychlost např. 9600 baudů. Není potřeba velkých rychlostí, tudíž je tato hodnota pro nás dostatečná. Pomocí frekvence oscilátoru mikrokontroléru a zvolené symbolové rychlosti (BAUD), můžeme spočítat hodnotu pro registr UBRR.

$$UBRR = \frac{f_{osc}}{16 \cdot BAUD} - 1 \quad (10)$$

$$UBRR = \frac{8\,000\,000}{16 \cdot 9600} - 1 = 51$$

Dalším registrem je UCSRB. 7. bit (1) zde povoluje vyvolání přerušení při dokončení příjmu. 6. bit (1) pak přerušení při dokončeném odeslání dat. Bit č. 4 (1) aktivuje přijímač a bit 3 (1) aktivuje vysílač.

UCSRB

7	6	5	4	3	2	1	0
RXCIE	TXCIE	UDRIE	RXEN	TXEN	UCSZ2	RXB8	TXB8
1	1	0	1	1	0	0	0

V registru UCSRC jde o nastavení formátu komunikačního rámce. Bit 6 (0) nastavuje typ komunikace jako asynchronní. Dvojice bitů 5,6 (00) deaktivuje v rámci paritní bit. Bit č. 3 (0) nastaví počet STOP bitů na jeden. A poslední bity 1,0 ve spojení s bitem 2 z registru UCSRB nastavují počet datových bitů v rámci na 8.

7	6	5	4	3	2	1	0
URSEL	UMSEL	UPM1	UPM0	USBS	UCSZ1	UCSZ0	UCPOL
1	0	0	0	0	1	1	0

Jako vstupně/výstupní registr pro přijímání i odesílání dat slouží registr UDR.

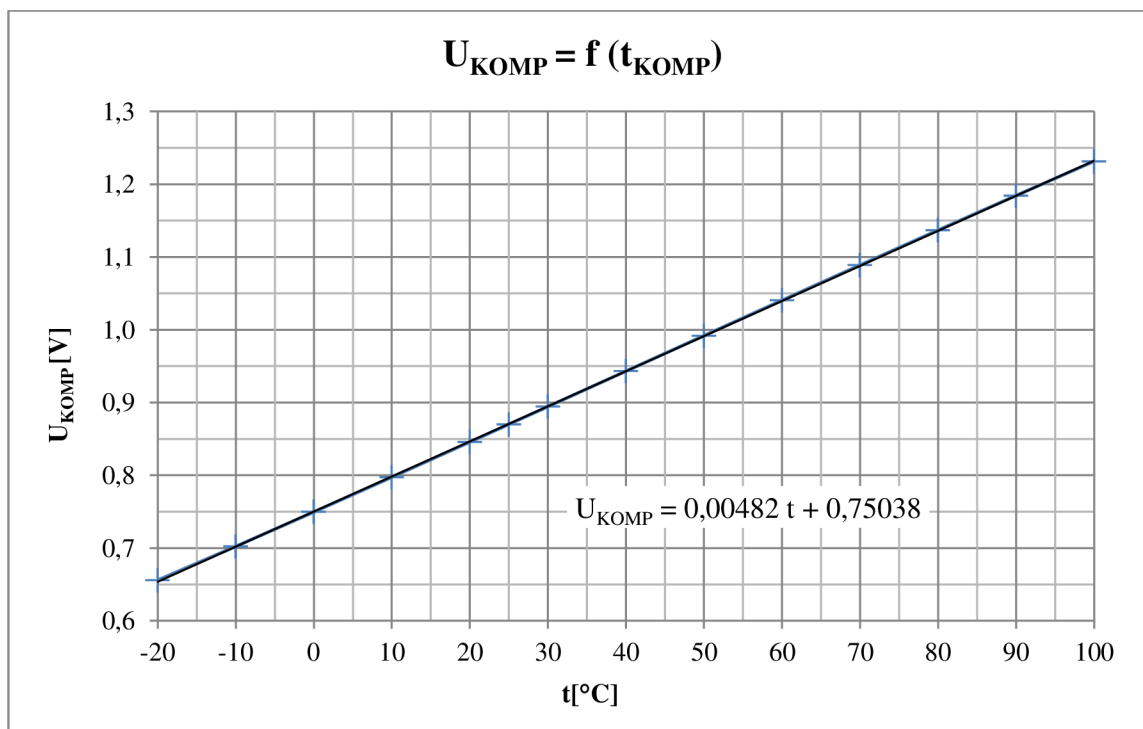
## 5.2 Výpočty a funkce v programu

### 5.2.1 Kompenzační čidlo

Pokud použijeme proloženou katalogovou závislost odporu čidla a teploty (obr. 5), můžeme z ní dostat vztah pro výpočet odporu čidla v následujícím tvaru

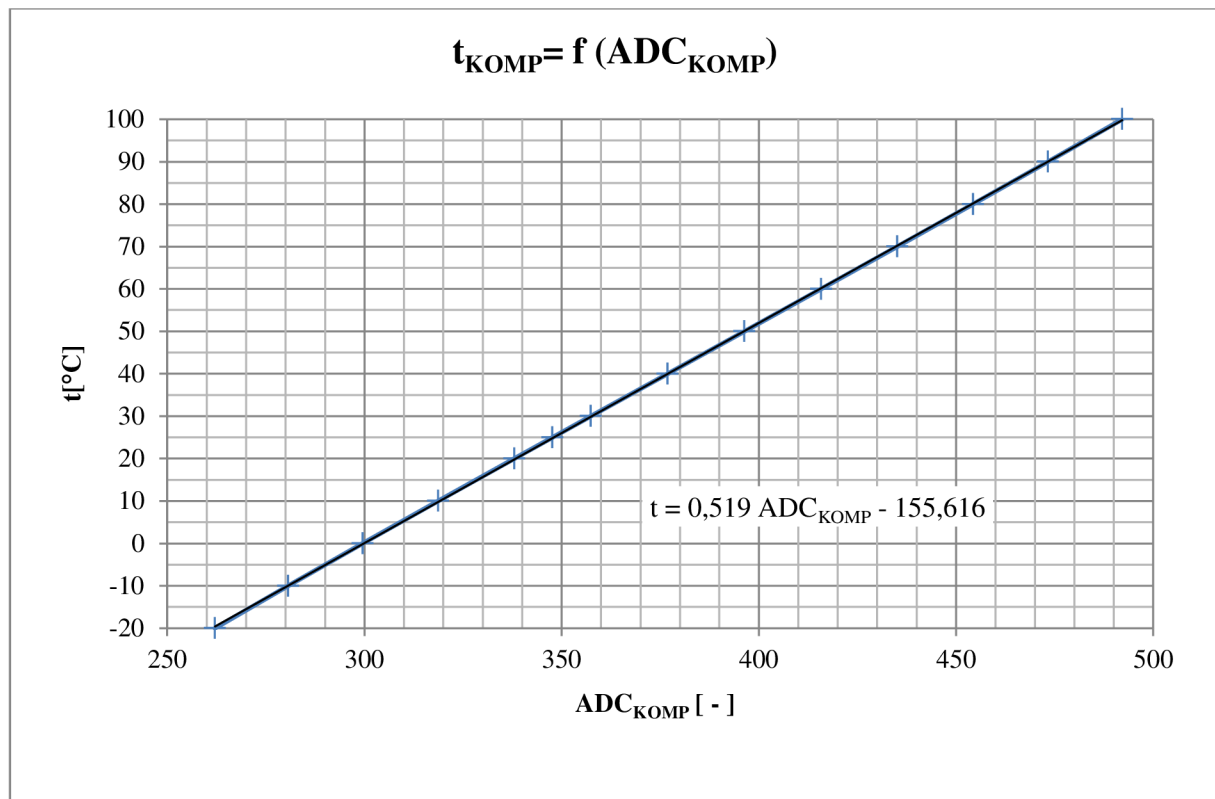
$$R = 0,0171t^2 + 6,7037t + 811,76 \quad [\Omega; ^\circ C] \quad (11)$$

V tomto vztahu je teplota  $t$  a odpor čidla  $R$ . Tento vztah platí obecně i pro čidlo vyhřívané, které je stejného typu. Dosazením tohoto vztahu do rovnice (7), kde za hodnotu  $R_1$  dosadím použitou hodnotu  $1500\Omega$  a za napětí  $U_N$  napájecí napětí  $3,3V$ , dostáváme závislost napětí na měřícím čidle (tj. i napětí na A/D převodníku) a samotné teploty.



**Obr. 12** Závislost napětí kompenzačního čidla a teploty

Pokud dále tuto závislost použijeme s rovnicí (5) pro výpočet hodnoty v registru ADC, dostáváme přímou závislost pro výpočet měřené teploty ze zmíněného výstupního registru A/D převodníku ADC. Jako reference je uvažována 2,56V vytvářená v mikrokontroléru.

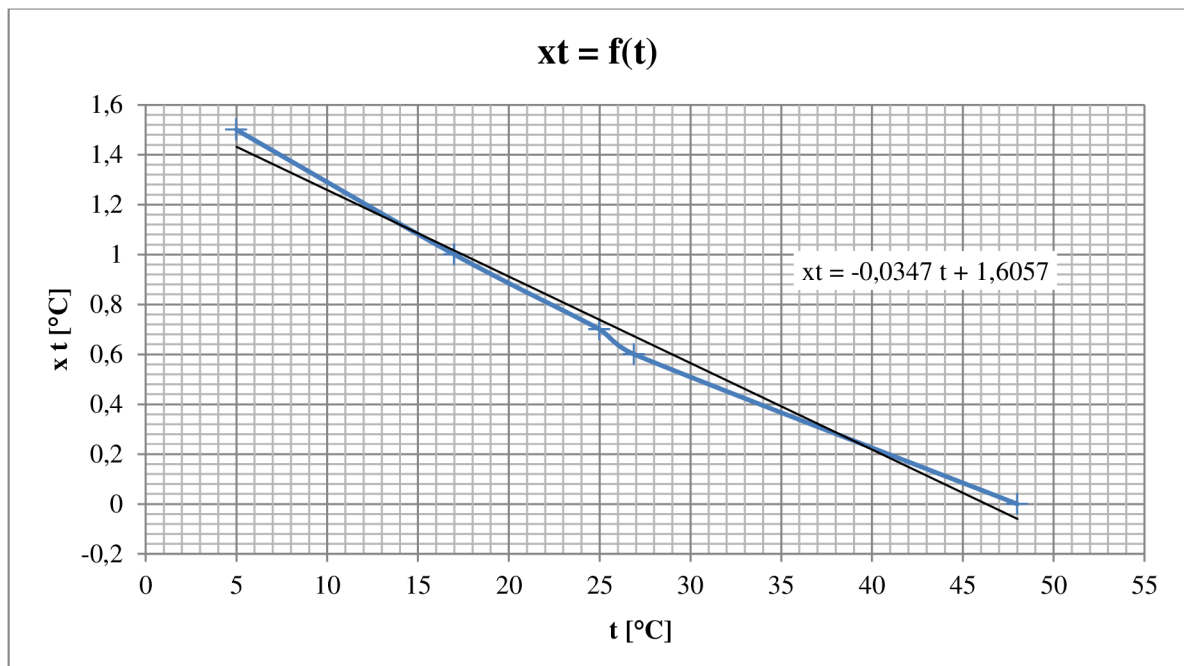


**Obr. 13** Závislost hodnoty v registru ADC a měřené teploty

Z této závislosti můžeme vyjádřit vztah pro výpočet kompenzační teploty v mikrokontroléru.

$$t_{KOMP} = 0,519 \cdot ADC - 155,616 \quad [^{\circ}C; -] \quad (12)$$

Ověřením měřičem měřené teploty pomocí přesnějšího teploměru získáme kalibrační funkci teploty. Tato kalibrace byla změřena v 5 bodech a je proložena lineární funkcí.



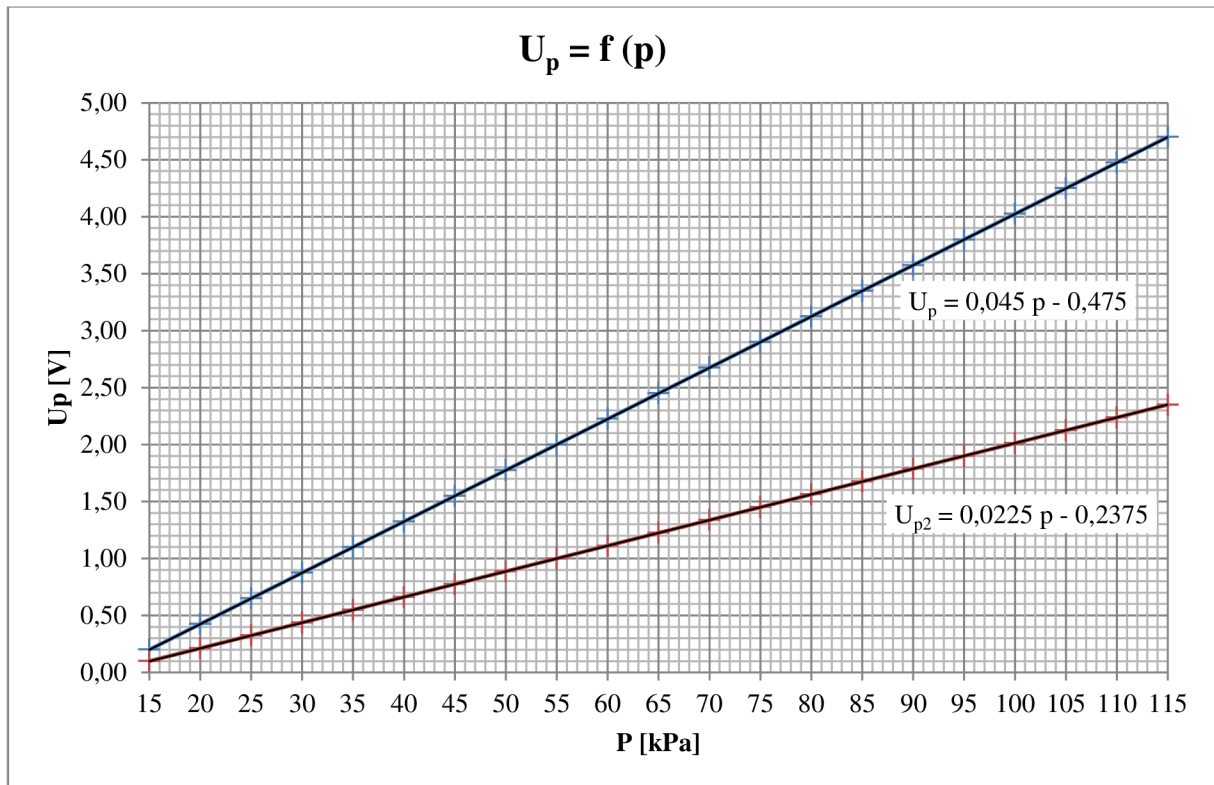
**Obr. 14** Kalibrační funkce teploty

Po sečtení s původní funkcí výpočtu teploty získáváme novou funkci.

$$t_{KOMP} = 0,501 \cdot ADC - 148,61 \quad [^{\circ}C; -] \quad (13)$$

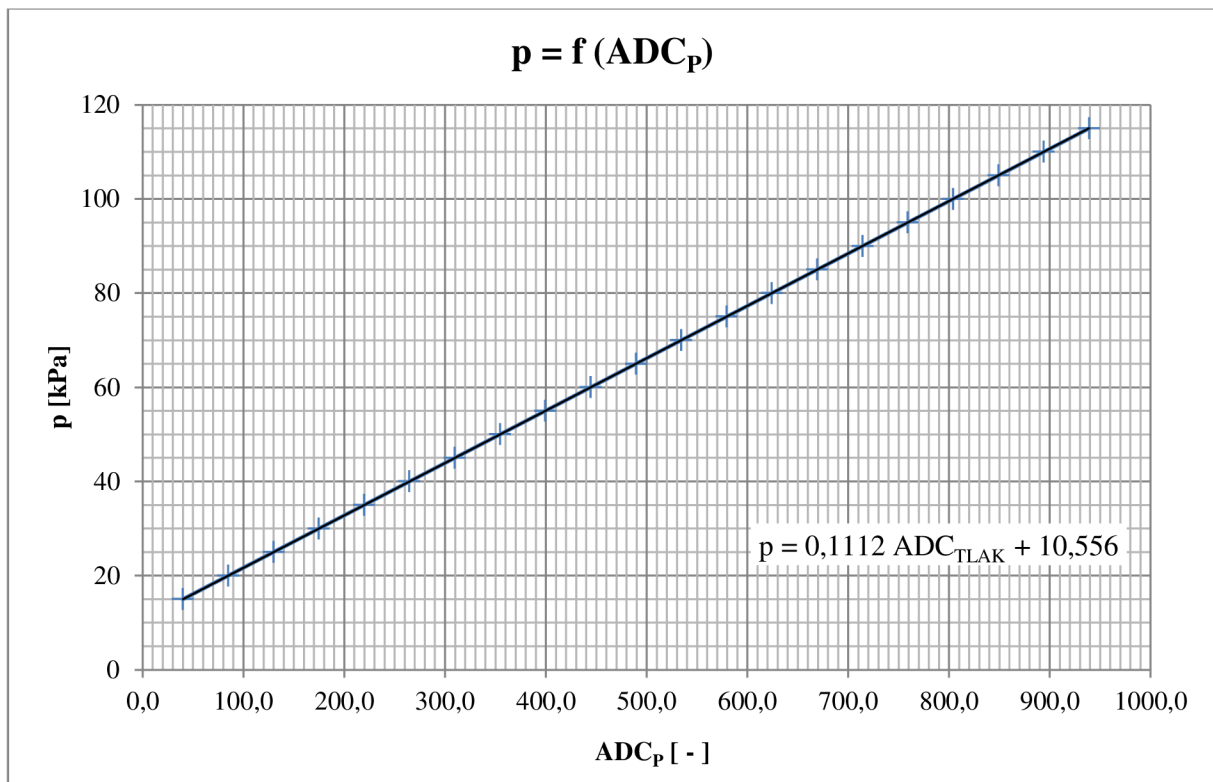
### 5.2.2 Tlakové čidlo

Závislost tlaku na výstupním napětí čidla je na obrázku 2. Pokud aplikujeme výpočet napětí na odporovém děliči na použité hodnoty odporů (obě totožné  $4700\Omega$ ), dostaneme se k hodnotě 0,5 krát přiložené napětí. To znamená, že z děliče půjde vždy poloviční napětí, než je výstupní napětí čidla.



**Obr. 15** Závislost napětí a měřeného tlaku

V grafu jsou 2 závislosti.  $U_p$  je původní katalogová charakteristika. Druhá závislost  $U_{p2}$  zahrnuje i měřicí dělič s poměrem 1:1. Použitím druhé zmiňované závislosti ve spojení s rovnicí (5) pro výpočet hodnoty A/D převodníku (při  $U_{REF} = 2,56V$ ), dostaneme přímou závislost pro výpočet měřeného tlaku z hodnoty v registru ADC.



**Obr. 16** Závislost hodnoty v registru ADC a měřeného tlaku

Z grafu můžeme vyjádřit vztah pro výpočet tlaku do programu mikrokontroléru.

$$p = 0,1112 \cdot ADC + 10,556 \quad [kPa; -] \quad (14)$$

Kalibrační vztah byl z důvodu komplikovanosti určen jen ve třech bodech, kdy čidlo měřilo vždy o konstantu menší hodnotu. Proto je ve výpočtu přičítána tato konstanta 46,1hPa.

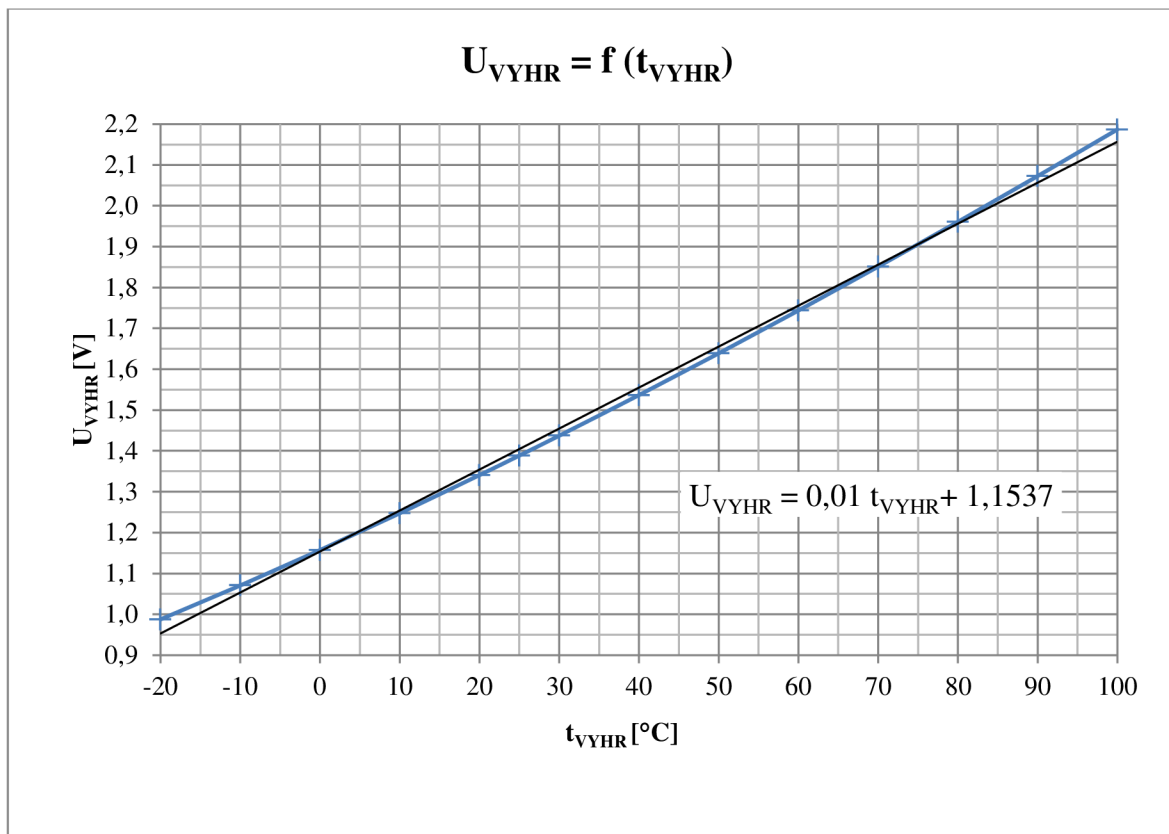
$$p = 0,1112 \cdot ADC + 15,166 \quad [kPa; -] \quad (15)$$

### 5.2.3 Vyhřívané čidlo

Jelikož je vyhřívané čidlo stejného typu jako kompenzační můžeme opět použít závislosti z obr. 5. Odpor čidla je pak dán stejným vztahem (11) jako u kompenzačního čidla.

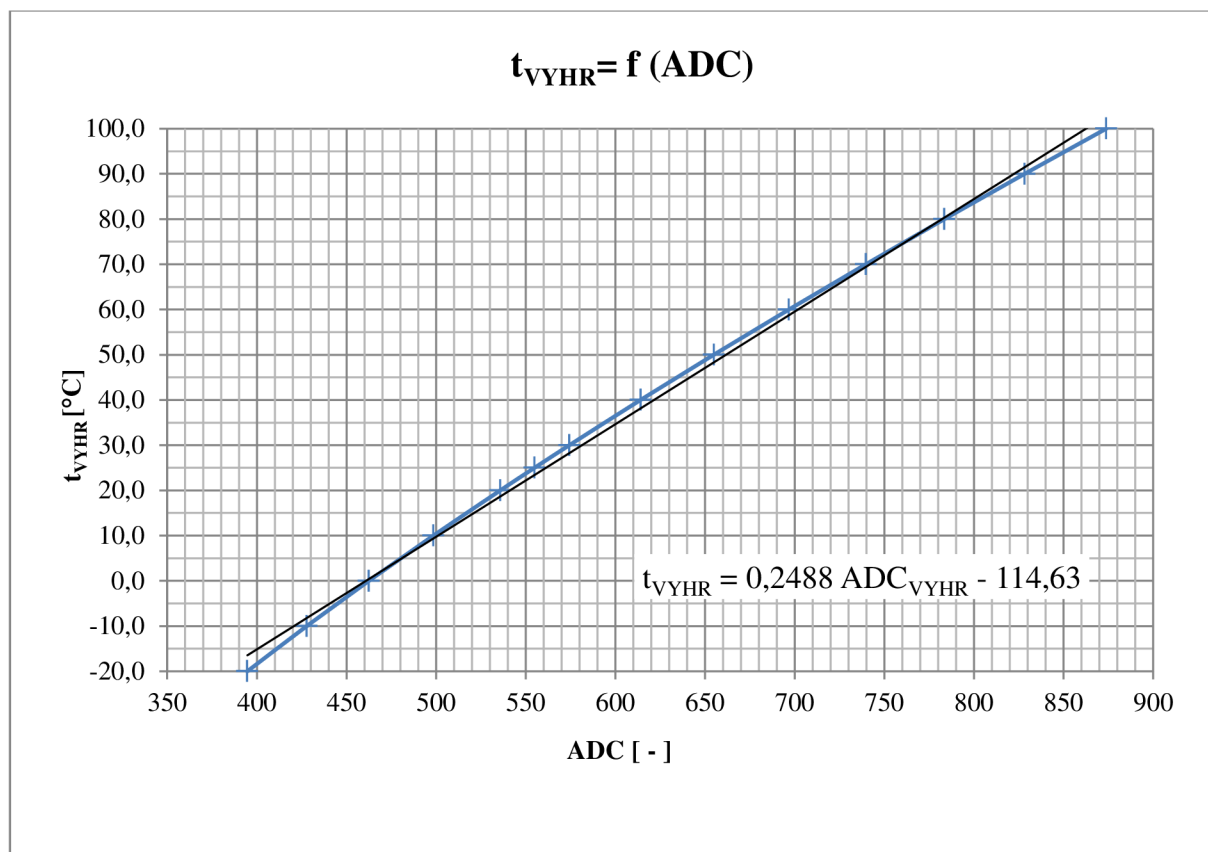
Vyhřívané čidlo je zapojeno v době proudové mezery, kdy se na něm měří teplota, v měřicím děliči s rezistorem  $R_2$  s hodnotou  $10k\Omega$ . Tento dělič je napájen napětím  $16,5V$  z měniče. Aby napětí měřené A/D převodníkem nepřesáhlo napájecí napětí  $3,3V$  je v zapojení i druhý dělič se zenerovou diodou.

Pokud základní závislost teploty vyhřívajícího čidla a jeho odporu dosadíme do vztahu pro výpočet napětí děliče (7) s upravenými indexy pro vyhřívané čidlo, dostaneme závislost napětí děliče a teploty čidla. Tuto závislost dále znovu aplikujeme do vztahu (7) s hodnotami druhého děliče  $R_{10} = 27k\Omega$  a  $R_{11} = 470k\Omega$ . Dostáváme tak závislost teploty čidla a napětí, měřené A/D převodníkem.



**Obr. 17** Závislost napětí z vyhřívaného čidla a jeho teploty

Pokud tuto závislost dále aplikujeme do vztahu (5) pro výpočet hodnoty ADC převedené A/D převodníkem, získáme přímou závislost teploty vyhřívaného čidla a převedené hodnoty v registru ADC. Jako referenční napětí je opět použito vnitřní reference 2,56V.



**Obr. 18** Závislost hodnoty v registru ADC a teploty vyhřívávaného čidla

Odtud můžeme vyjádřit vztah pro přímý výpočet v mikrokontroléru.

$$t_{VYHR} = 0,2488 \cdot ADC - 114,63 \quad [^{\circ}C; -] \quad (16)$$

Toto čidlo bude elektronicky vyhříváno na teplotu  $t_{VYHR}$ , o konstantu  $\Delta t$  vyšší, než bude změřená kompenzační teplota  $t_{KOMP}$ .

$$t_{VYHR} = t_{KOMP} + \Delta t \quad [^{\circ}C] \quad (17)$$

Pokud chceme dostat funkci pro mikrokontrolér, která bude přímo počítat potřebnou hodnotu  $ADC_{VYHR}$  z kompenzační hodnoty  $ADC_{KOMP}$ , což jsou hodnoty převedené A/D převodníkem z jednotlivých čidel, je třeba prvně vyjádřit hodnotu  $ADC_{VYHR}$  ze vztahu (14).

$$ADC_{VYHR} = 4,0193 \cdot t_{VYHR} + 460,73 \quad [-; ^{\circ}C] \quad (18)$$

Do tohoto vztahu dosadíme za  $t_{VYHR}$  vztah (16), kde rovnou za  $t_{KOMP}$  dosadíme vztah (12) pro výpočet teploty z ADC hodnoty.

$$ADC_{VYHR} = 4,0193 \cdot (0,519 \cdot ADC_{KOMP} - 155,616 + \Delta t) + 460,73 \quad [-; ^{\circ}C] \quad (19)$$

Po úpravě

$$ADC_{VYHR} = 2,086 \cdot ADC_{KOMP} + (4,0193 \cdot \Delta t - 164,74) \quad [-; ^{\circ}C] \quad (20)$$



Celou závorku můžeme označit jako  $\Delta ADC$ .

$$ADC_{VYHR} = 2,086 \cdot ADC_{KOMP} + \Delta ADC \quad [-; -] \quad (21)$$

Kde  $\Delta ADC$  je určeno vztahem

$$\Delta ADC = 4,0193 \cdot \Delta t - 164,74 \quad [-; ^\circ C] \quad (22)$$

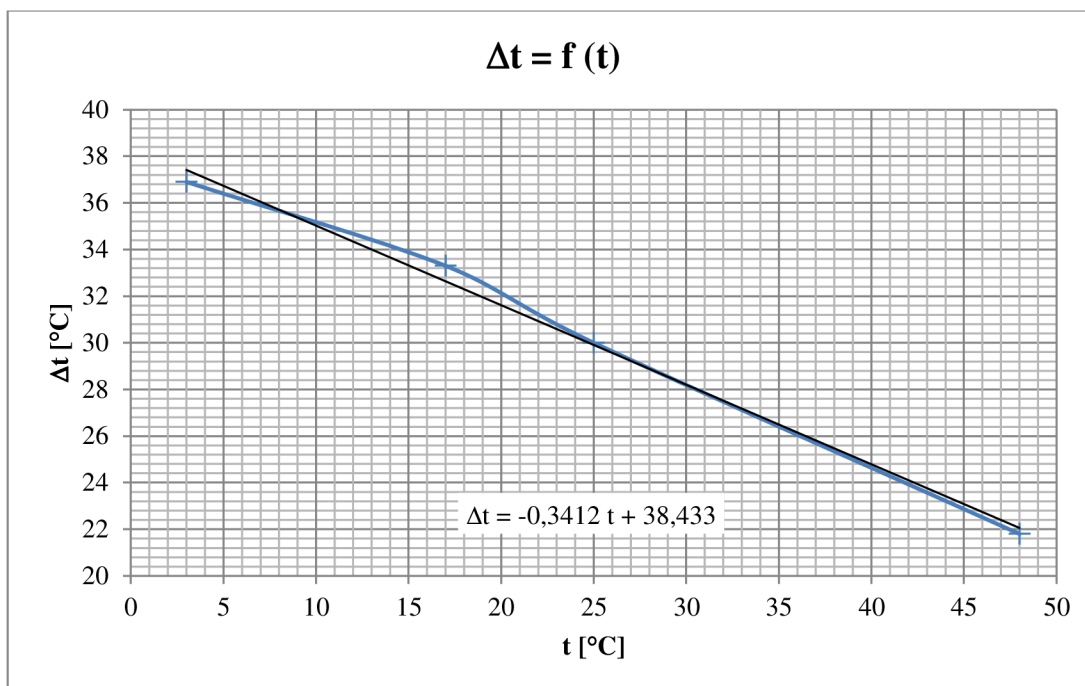
## 5.2.4 Kompenzace teploty

Pro udržení hodnoty teploty vyhřívaného čidla si regulační program v mikrokontroléru nastaví potřebnou hodnotu v registru OCR1B, což představuje střidu PWM signálu vyhřívající čidlo. Při nulové rychlosti proudění vzduchu hodnota střidy stojí na jedné výchozí hodnotě. Tato hodnota se ale liší pro různé teploty měření, zjištěné kompenzačním čidlem. Jelikož z hodnoty v registru OCR1B budeme v programu počítat pomocí zjištěné závislosti hodnotu rychlosti vzduchu, je třeba zajistit, aby hodnota OCR1B byla při různých teplotách měření stejná. To lze realizovat tak, že změníme hodnotu teplotního rozdílu čidel při různých teplotách podle experimentálně zjištěné závislosti. Tu můžeme určit pokusným nastavováním teplotního rozdílu čidel při různých teplotních podmínkách při setrvání konstantní zvolené hodnoty v registru OCR1B. Tím získáme pro každou teplotu měření příslušný teplotní rozdíl  $\Delta t$ . Hlídaná konstanta v registru OCR1B se pak stane výchozí nulovou hodnotou pro výpočet rychlosti vzduchu.

t	OCR1B	$\Delta t$
$^\circ C$	-	$^\circ C$
3	33400	36,9
17	33400	33,3
25	33400	30
48	33400	21,8

**Tab. 2** Teplotní kompenzace vyhřívání

Měření ukázalo, že závislost teploty a teplotního rozdílu pro udržení konstantní teploty vyhřívaného čidla je téměř konstantní a při různých teplotních rozdílech čidel se liší jen o konstantní složku funkce. Pro naše měření byla stanovena kompromisní hodnota mezi přesností a rozsahem, a to  $\Delta t = 25^\circ C$ . Při této hodnotě se maximální měřená rychlost větru pohybovala asi na 130km/h.



**Obr. 19** Závislost hodnoty teplotního rozdílu čidel na teplotě měření

Z tohoto grafu lze vyjádřit závislost teplotního rozdílu a teploty jako

$$\Delta t = -0,3412 \cdot t + 38,433 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (23)$$

Funkci pro zvolený výchozí teplotní rozdíl (při 25°C) lze pak aplikovat přímo do výpočtové funkce (18) rozdílu ADC hodnot. Jelikož se funkce pro různé teplotní rozdíly liší jen ve složce konstanty, v programu jde mezi případnými režimy s různými těmito rozdíly přepínat změnou právě této konstanty, která se změní jen o hodnotu změny teplotního rozdílu.

### 5.2.5 Rychlost větru

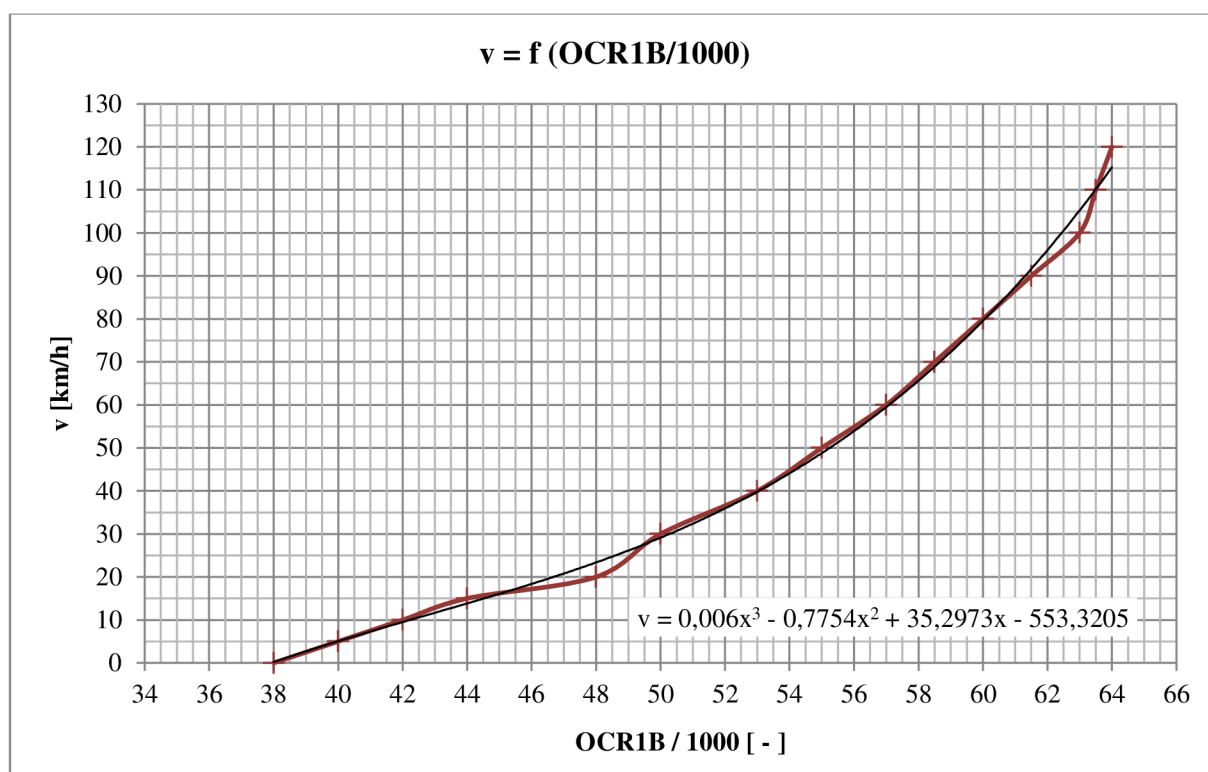
Rychlost větru lze přímo přepočítat pomocí zjištěné závislosti z hodnoty registru OCR1B, který udává hodnotu střidy PWM signálu generovaného na vyhříváném čidle. Jelikož se teplota na vyhříváném čidle udržuje konstantní podle kompenzační teploty, tato hodnota v registru OCR1B je při nulové rychlosti větru také konstantní. Při ochlazování čidla proudícím vzduchem musí systém udržovat zmíněnou konstantní teplotu. To provede tak, že patřičně zvýší střidu PWM signálu. Tímto je dána závislost rychlosti proudění vzduchu a hodnoty OCR1B.

Tuto závislost je prvně nutné zajistit experimentálně. Změřena byla pomocí automobilu, na který byly pomocí distanční antény upevněny měřící čidla. Rychlost auta simulující rychlost větru jsme měřili pomocí GPS navigace. Pro každou rychlost jsme pak pomocí počítače a obslužného softwaru odečetli příslušnou hodnotu OCR1B.

Hodnoty jsou změřeny pro nastavení teplotního rozdílu  $\Delta t$  25°C. Všechny tyto hodnoty byly změřeny při teplotě asi 20°C.

	$\Delta t 25^{\circ}\text{C}$
<b>v</b>	<b>OCR1B/1000</b>
<b>km/h</b>	-
0	38,0
5	40,0
10	42,0
15	44,0
20	48,0
30	50,0
40	53,0
50	55,0
60	57,0
70	58,5
80	60,0
90	61,5
100	63,0
110	63,5
120	64,0

**Tab. 3** Závislost OCR1B na rychlosti větru



**Obr. 20** Změřená závislost OCR1B a rychlosti větru

Rychlost proudění vzduchu se pak v mikrokontroléru spočítá jako

$$v = 0,006 \cdot b^3 - 0,7754 \cdot b^2 + 35,2973 \cdot b - 533,3205 \quad \left[ \frac{km}{h}; - \right] \quad (24)$$

Tuto hodnotu lze případně přepočítat na jednotky  $ms^{-1}$  jednoduchým vztahem

$$v_{m/s} = \frac{v_{km/h}}{3,6} \quad \left[ \frac{m}{s}; \frac{km}{h} \right] \quad (25)$$

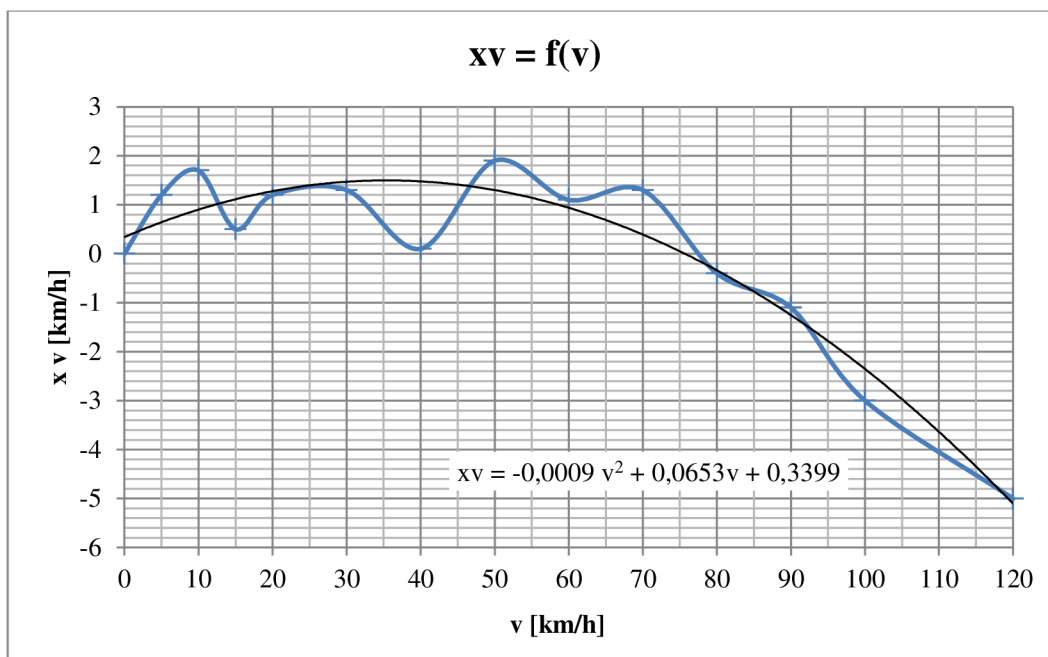
Ve vztahu (24) je členem „b“ myšlena hodnota OCR1B/1000.

Při této variantě (s nastavením  $\Delta t = 25^\circ C$ ) je rozsah nastavení hodnot OCR1B největší, čímž se měřitelný krok rychlosti minimalizuje. Tato varianta je už ale v našem měřiči limitována maximální možnou nastavitelnou střidou PWM signálu a příslušnou maximální rychlostí vzduchu asi 130km/h. Zvýšení rozsahu by šlo realizovat případným zvýšením napětí měniče popř. snížením teplotního rozdílu za cenu snížení přesnosti měření.

Ověření funkce měření rychlosti proběhlo ověřováním hodnot z GPS navigace a hodnot ze samotného měřiče. Hodnota absolutní odchylky kolísala v celém rozsahu v rozmezí do 2km/h. Na konci rozsahu za hodnotou rychlosti 100km/h mírně vzrostla.

<b>V GPS</b>	<b>V měřič</b>	<b>xV</b>
<i>km/h</i>	<i>km/h</i>	<i>km/h</i>
0	0	0
5	6,2	1,2
10	11,7	1,7
15	15,5	0,5
20	21,2	1,2
30	31,3	1,3
40	40,1	0,1
50	51,9	1,9
60	61,1	1,1
70	71,3	1,3
80	79,6	-0,4
90	88,9	-1,1
100	97	-3
120	115	-5

**Tab. 4** Kalibrační hodnoty rychlosti větru



**Obr. 21** Kalibrační funkce rychlosti větru

Proložení kalibrační závislosti dostáváme vztah pro úpravu výchozího vztahu (24).

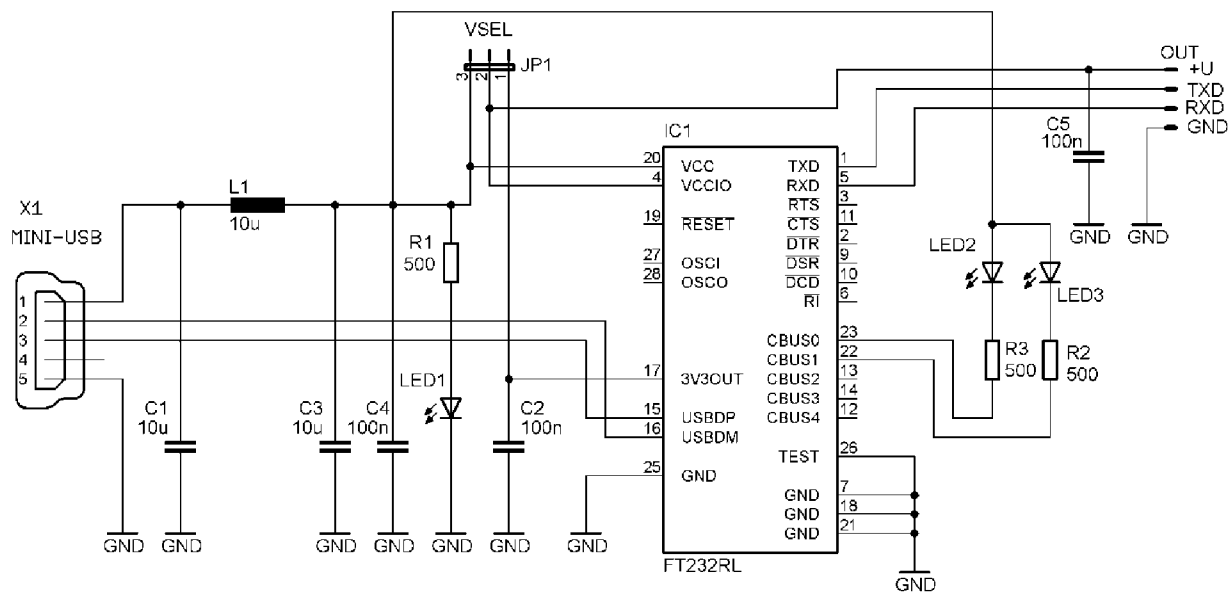
Pokud podle kalibrační funkce spočteme pro každou hodnotu rychlosti příslušnou odchylku a odečteme ji od výchozí hodnoty rychlosti, dostaneme novou závislost pro výpočet rychlosti.

$$v = 0,00768 \cdot b^3 - 1,005 \cdot b^2 + 45,927 \cdot b - 716,0032 \quad \left[ \frac{km}{h}; - \right] \quad (24)$$

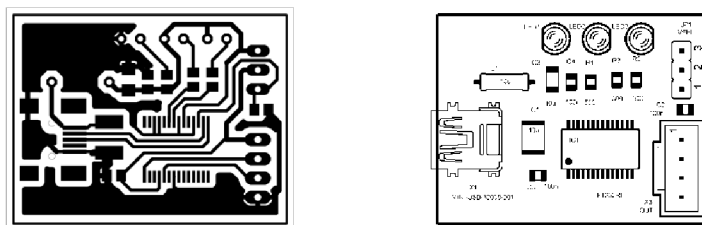
### 5.3 Základní obslužný software

Pro základní komunikaci s měřičem byl sestaven základní software pomocí vývojového prostředí Borland Builder C++. Program slouží ke čtení všech měřených hodnot a nastavení základních parametrů měření.

Komunikace mezi měřičem a programem je zajištěna pomocí sériové linky UART. Pro tento účel byl navržen a zhotoven jednoduchý převodník rozhraní USB – UART. Lze využít i běžného rozhraní RS-232. Kvůli absenci tohoto rozhraní u novějších počítačů a zejména notebooků se více hodí řešení se zmíněným převodníkem. Jelikož není tato záležitost obsahem práce, není potřeba jej více rozebírat. Proto je uvedeno jen schéma a navržená DPS.

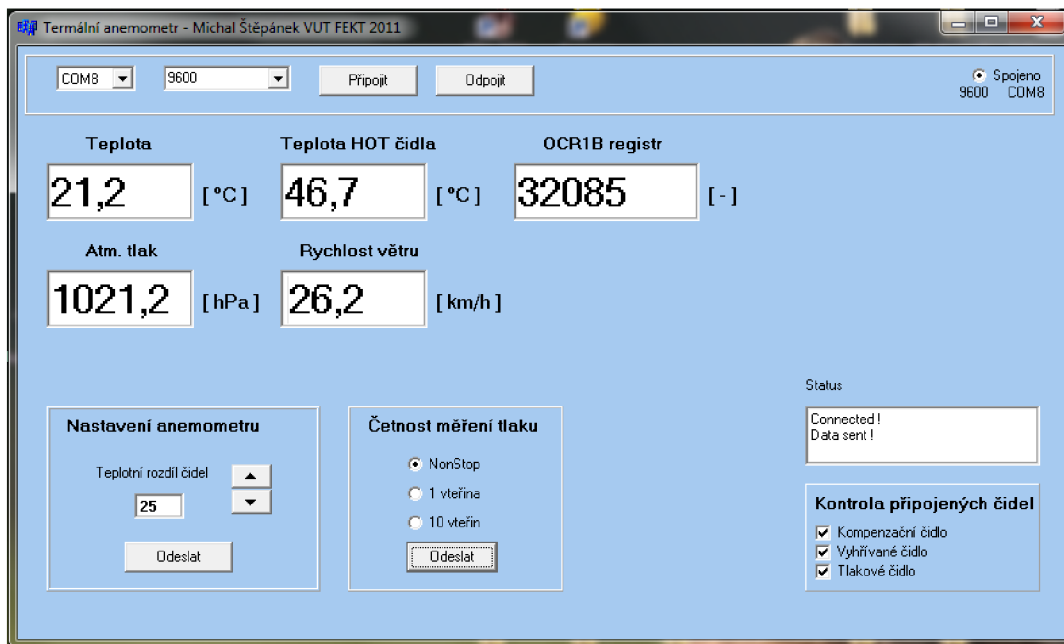


**Obr. 22** Schéma převodníku USB-UART



**Obr. 23** DPS a osazovací plán převodníku USB-UART

Samotný program k měřiči je pro obsluhu velice jednoduchý. Pomocí nabídky se vybere příslušný port sériové linky a použitá rychlost komunikace. Poté se stiskem tlačítka „připojit“ naváže spojení s měřičem. Jako výchozí rychlost komunikace je v měřiči nastavena rychlost 9600Bd. Příslušná pole pak zobrazují konkrétní změřené hodnoty. V případě nepřipojení nebo chyby některého z čidel je stav indikován pomocí nezaškrtnutého políčka s názvem konkrétního čidla a jeho změřená hodnota se nezobrazí. Pomocí programu jde také nastavit v měřiči teplotní rozdíl čidel (tato volba sloužila jako pomocná funkce při oživování a kalibraci – pro měření je neaktivní a nemá žádný vliv na nastavení měřiče). Měřič je kalibrován pouze na výchozí hodnotu  $\Delta t$  25°. Dále je možné nastavit četnost měření tlaku. Tato volba může snížit spotřebu celého systému, protože při ní dochází k vypínání stabilizátoru napětí 5V, napájející tlakové čidlo.



Obr. 24 Základní obslužný software měřiče

## Závěr

Seznámili jsme se s teplotními anemometry a jejich možnými provedeními. Po řadě měření a experimentů bylo navrženo zapojení s požadovanými parametry. Navržený měřicí systém dokáže měřit rychlost větru, teplotu proudícího vzduchu a atmosférický tlak. Všechny měřené hodnoty pak odesílá formou dat do řídicího počítače, popř. jiného elektronického zařízení.

Celý měřič je realizován na obojstranné desce plošných spojů o rozměrech 3x3cm. Tato deska je z obou stran osazena součástkami pro povrchovou montáž. Všechny vývody měřiče jsou realizovány obyčejnými konektory.

Rychlost větru se vyhodnocuje pomocí míry ochlazení elektronicky vyhřívaného čidla. Tato teplota se vytváří spínáním potřebného napětí na čidlo šířkově modulovaným signálem. Jelikož je použito monokrystalické čidlo KTY83-121, které dosahuje v pracovním rozsahu hodnot, až  $1600\Omega$ , bylo třeba vytvoření vyššího napětí z napájecího zdroje s hodnotou 3,3V pomocí vzestupného měniče. Potřebné napětí bylo spočítáno a experimentálně ověřeno na hodnotě asi 16,5V. Měnič je buzen PWM signálem z 8bitového čítače/časovače 2 mikrokontroléru. Jeho frekvence při taktu 8MHz je maximálně 31,25kHz. Tento kmitočet a celkový chod měniče negativně ovlivňuje rušením chod celého měřiče. Měřené hodnoty vlivem tohoto rušení mírně kolísají.

Přesnost měřiče není srovnatelná s profesionálními měřiči, ale pro orientační měření v libovolném směru použití určitě postačí. Nejpřesněji měří systém ve středních hodnotách kolem 50km/h, v místě strmější závislosti rychlosti a střidy vyhřívacího signálu. Spotřeba celého systému se pohybuje kolem hodnoty 0,3W. Časová reakce, tvořená nastavením aktivní regulační smyčky v programu mikrokontroléru je několik sekund. Pro orientační měření je tak dostačující. Přesnost měřiče závisí do jisté míry i na zmíněném rušení od měniče napětí. Tento problém byl minimalizován úpravou součástek měniče na nejlepší možné hodnoty. I proto je v návrhu desky plošných spojů na místě filtračního kondenzátoru za měničem původně menší tantalový kondenzátor, který byl později nahrazen větším elektrolytickým kondenzátorem s vyšší kapacitou. Tento problém se stabilizací napětí měniče by se dal dále kompenzovat zvýšením kmitočtu buzení měniče nebo zvýšením hodnot akumulárních prvků v měniči.



## Seznam zkratek a symbolů

ADC	Analog-to-Digital Converter; analogově číslicový převodník
CCA	Constant Current Anemometer; anemometr s konstantním proudem čidlem
CTA	Constant Temperature Anemometer; anemometr s konstantní teplotou čidla
ISP	In-System Programming; programování v systému
NTC	Negative Temperature Coefficient; záporný teplotní součinitel
PTC	Positive Temperature Coefficient; kladný teplotní součinitel
PWM	Pulse-Width Modulation; pulzně šířková modulace
SMD	Surface Mount Technology; technologie povrchové montáže
UART	Universal Asynchronous Serial Receiver and Transmitter; univerzální asynchronní sériový přijímač a vysílač
$\Delta$ ADC	rozdíl hodnot A/D převodu mezi teplotními čidly
$\Delta t$	teplotní rozdíl mezi čidly
$\delta$	činitel plnění budícího signálu pro měnič
T	perioda budícího signálu pro měnič
ADC	výsledná hodnota převedená A/D převodníkem
ADC <sub>KOMP</sub>	hodnota po A/D převodu z kompenzačního čidla
ADC <sub>VYHR</sub>	hodnota po A/D převodu z vyhřívaného čidla
ADC <sub>TLAK</sub>	hodnota po A/D převodu z tlakového čidla
OCR1B	komparační hodnota čítače/časovače 1 B
OCR2	komparační hodnota čítače/časovače 2
U <sub>IN</sub>	vstupní napětí A/D převodníku
U <sub>REF</sub>	referenční hodnota A/D převodníku
U <sub>KOMP</sub>	napětí na kompenzačním čidle
U <sub>VYHR</sub>	napětí na vyhřívaném čidle
U <sub>p</sub>	napětí na tlakovém čidle
U <sub>O</sub>	výstupní napětí měniče
U <sub>I</sub>	vstupní napětí měniče
p	atmosferický tlak
t <sub>KOMP</sub>	kompenzační teplota
t <sub>VYHR</sub>	teplota vyhřívaného čidla
v	rychlost větru
v <sub>m/s</sub>	rychlost v metrech za sekundu
v <sub>km/h</sub>	rychlost v kilometrech za hodinu

## Seznam tabulek

Tab. 1	Seznam použitých součástí .....	25
Tab. 2	Teplotní kompenzace vyhřívání .....	36
Tab. 3	Závislost OCR1B na rychlosti větru .....	38
Tab. 4	Kalibrační hodnoty rychlosti větru .....	39

## Seznam obrázků

Obr.1	Integrované tlakové čidlo .....	10
Obr.2	Závislost výstupního napětí na absolutní hodnotě tlaku .....	11
Obr.3	Principiální schéma použitého vzestupného měniče.....	14
Obr.4	Zjednodušené blokové schéma měřiče .....	16
Obr.5	Teplotní závislost odporu čidla .....	18
Obr.6	Průběh sériové komunikace (mód 7E2) .....	19
Obr. 7	Průběh komunikace na sběrnice I2C.....	20
Obr. 8	Okamžité průběhy signálů čítače/časovače v režimu fast PWM.....	21
Obr. 9	DPS a osazovací plán vrstvy TOP (1:1) .....	22
Obr. 10	DPS a osazovací plán vrstvy BOTTOM (1:1) .....	22
Obr. 11	Schéma zapojení měřiče .....	23
Obr. 12	Závislost napětí kompenzačního čidla a teploty .....	29
Obr. 13	Závislost hodnoty v registru ADC a měřené teploty .....	30
Obr. 14	Kalibrační funkce teploty.....	31
Obr. 15	Závislost napětí a měřeného tlaku .....	32
Obr. 16	Závislost hodnoty v registru ADC a měřeného tlaku .....	33
Obr. 17	Závislost napětí z vyhřívaného čidla a jeho teploty .....	34
Obr. 18	Závislost hodnoty v registru ADC a teploty vyhřívaného čidla.....	35
Obr. 19	Závislost hodnoty teplotního rozdílu čidel na teplotě měření .....	37
Obr. 20	Změřená závislost OCR1B a rychlosti větru .....	38
Obr. 21	Kalibrační funkce rychlosti větru .....	40
Obr. 22	Schéma převodníku USB-UART .....	41
Obr. 23	DPS a osazovací plán převodníku USB-UART .....	41
Obr. 24	Základní obslužný software měřiče .....	42

# Seznam příloh

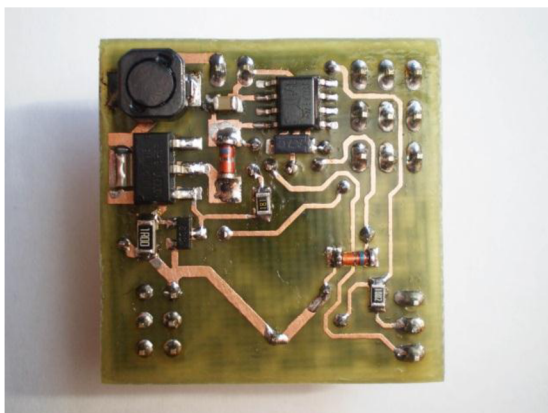
A Fotodokumentace

## Použitá literatura

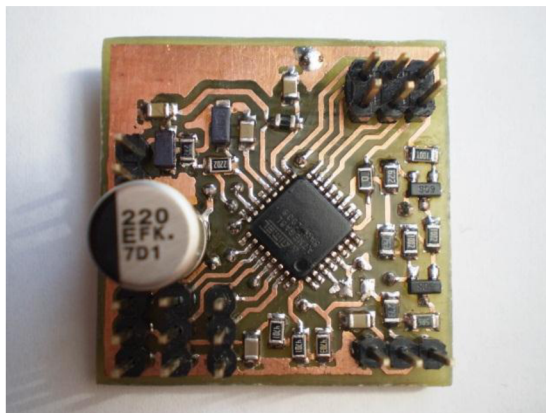
- [1] DOSEDĚL, Martin. *Elektronické měření rychlosti proudění plynů*. Brno: FEKT VUT v Brně, 2005, 21s.
- [2] DAĎA, Petr. *Realizace měřiče rychlosti větru s aktivní regulační smyčkou*. Brno: FEKT VUT v Brně, 2007, 61s.
- [3] KRŠKA, Vlastimil. *Rezonanční a Quasi-rezonanční měniče*. Brno: FEKT VUT v Brně, 2008, 41s.
- [4] HYNĀAR, Karel. *Elektronický anemometr*. Amatérské rádio, 1989, roč. 38, č. 7, s 252 – 255. ISSN 0322-9572.
- [5] Krejčířik, Alexandr. *Spínané zdroje*. Konstrukční elektronika, 2000, č. 3.
- [6] FRÝZA, Tomáš; FEDRA, Zbyněk; ŠEBESTA, Jiří. *Mikroprocesorová technika, Laboratorní cvičení*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 50s.
- [7] NOVOTNÝ, Vlastislav; VOREL, Pavel; PATOČKA, Miroslav. *Napájení elektronických zařízení*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 139s.
- [8] ATmega8L [online]. Atmel Corporation, únor 2011. Dostupné na WWW: [http://www.atmel.com/dyn/resources/prod\\_documents/doc2486.pdf](http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc2486.pdf).
- [9] FAKTOR, Zdeněk. *Transformátory a tlumivky pro spínané napájecí zdroje*. 1. vydání. Praha: BEN – Technická literatura, 2002. 229s. ISBN 80.86056-91-0.
- [10] GM Electronic spol. s.r.o. [online]. Dostupné na WWW: <http://www.gme.cz>.
- [11] GES-Electronics, a.s. [online]. Dostupné na WWW: <http://www.ges.cz>.
- [12] SOS Electronic s.r.o. [online]. Dostupné na WWW: <http://www.soselectronic.cz>
- [13] MPX4115 integrated silicon pressure sensor [online]. Motorola, Inc. 1997. Dostupné na WWW: [http://www.datasheetcatalog.com/datasheets\\_pdf/M/P/X/4/MPX4115.shtml](http://www.datasheetcatalog.com/datasheets_pdf/M/P/X/4/MPX4115.shtml).
- [14] KTY83-121 Silicon temperature sensors [online]. Philips Semiconductors. 2003. Dostupné na WWW: [http://www.datasheetcatalog.com/datasheets\\_pdf/K/T/Y/8/KTY83-121.shtml](http://www.datasheetcatalog.com/datasheets_pdf/K/T/Y/8/KTY83-121.shtml).
- [15] LE00AB/C Series, Very low drop voltage regulators with inhibit [online]. STMicroelectronics. 2002. Dostupné na WWW: [http://www.datasheetcatalog.com/datasheets\\_pdf/L/E/5/0/LE50CD.shtml](http://www.datasheetcatalog.com/datasheets_pdf/L/E/5/0/LE50CD.shtml)

- [16] IRL2705, Power MOSFET [online]. International Rectifier. 1999. Dostupné na WWW: [http://www.datasheetcatalog.com/datasheets\\_pdf/I/R/L/L/IRLL2705.shtml](http://www.datasheetcatalog.com/datasheets_pdf/I/R/L/L/IRLL2705.shtml)

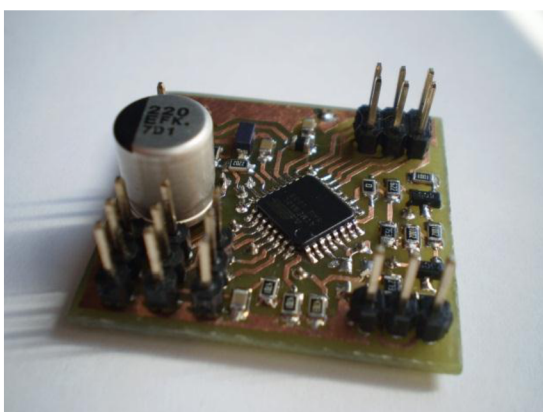
## A Fotodokumentace



Obr. A.1 DPS spodní vrstva



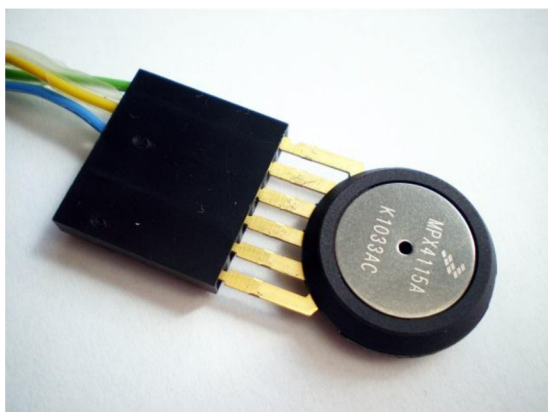
Obr. A.2 DPS horní vrstva



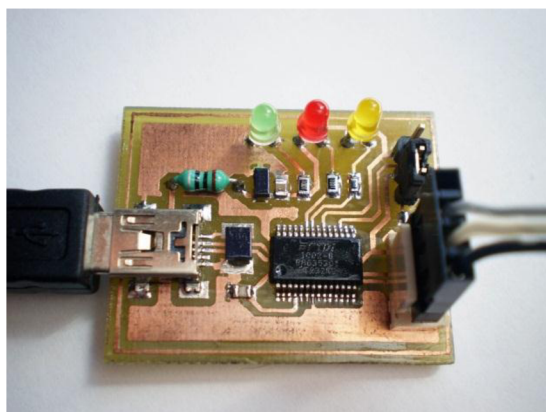
Obr. A.3 DPS



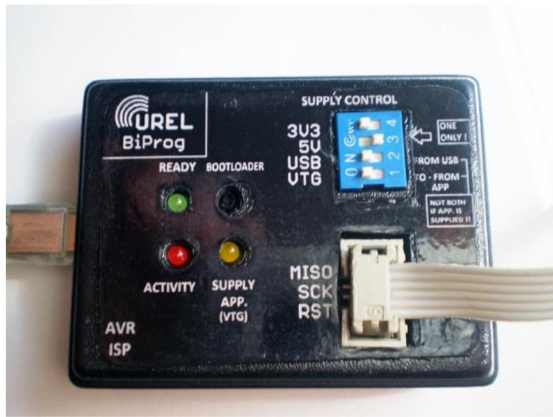
Obr. A.4 Detail teplotních čidel



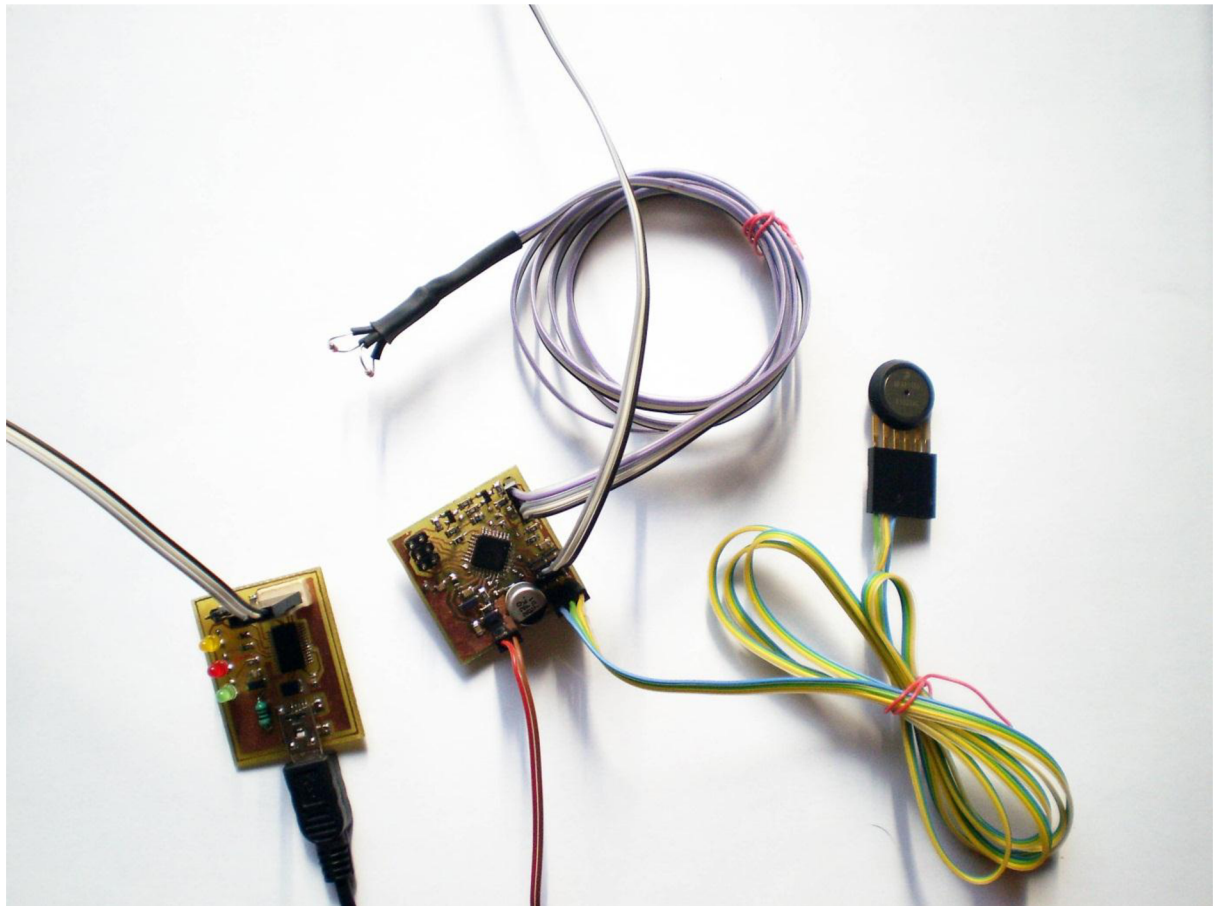
Obr. A.5 Tlakové čidlo



Obr. A.6 USB-UART převodník



Obr. A.7 ISP programátor



Obr. A.8 Celkové zapojení měřiče