



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA MIKROELEKTRONIKY

APLIKOVANÁ ELEKTRONIKA

Bakalářská práce

## Jednoduchý variometr pro paragliding

*Josef Gečnuk*

Vedoucí práce: Prof. Ing. Miroslav Husák, CSc.

23. května 2014

České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta elektrotechnická

katedra mikroelektroniky

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **GEČNUK Josef**

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika  
Obor: Aplikovaná elektronika

Název tématu: **Jednoduchý variometr pro paragliding**

### **Pokyny pro vypracování:**

1. Provedte rešerši současného stavu řešení elektronických variometrů využitelných především pro paragliding, event. pro bezmotorové kluzáky.
2. Navrhněte a realizujte jednoduchý elektronický variometr využitelný pro paragliding, pro návrh využijte vhodný typ mikroprocesoru, doplňte vhodným typem tlakového senzoru a displejem.
3. Vyhodnotte dosažené parametry realizovaného vzorku, porovnejte s parametry dostupných variometrů.
4. Provedte jednoduchý ekonomický rozbor pro event. výrobu se zahrnutím ceny vývoje.

### **Seznam odborné literatury:**

1. Neumann, P.-Uhlíř, J.: Elektronické obvody a funkční bloky (I, II), ČVUT 2001.
2. DRAXLER, K.: Přístrojové systémy letadel II. Praha. ČVUT, 2002. 124 s.
3. Vrkoč, J.: Elektronický variometr, Bc práce, ČVUT FEL, 2009

Vedoucí: **Prof. Ing. Miroslav Husák, CSc.**

Platnost zadání: 31. 8. 2015

L.S.

Prof. Ing. Miroslav Husák, CSc.  
vedoucí katedry

Prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
děkan

V Praze dne 23. 1. 2014

---

## Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mé práce Prof. Ing. Miroslavu Husákovi, CSc., za cenné rady při zpracování bakalářské práce.



---

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Beru na vědomí, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorského zákona, ve znění pozdějších předpisů. V souladu s ust. § 46 odst. 6 tohoto zákona tímto uděluji nevýhradní oprávnění (licenci) k užití této mojí práce, a to včetně všech počítačových programů, jež jsou její součástí či přílohou a veškeré jejich dokumentace (dále souhrnně jen „Dílo“), a to všem osobám, které si přejí Dílo užít. Tyto osoby jsou oprávněny Dílo užít jakýmkoli způsobem, který nesnižuje hodnotu Díla a za jakýmkoli účelem (včetně užití k výdělečným účelům). Toto oprávnění je časově, teritoriálně i množstevně neomezené. Každá osoba, která využije výše uvedenou licenci, se však zavazuje udělit ke každému dílu, které vznikne (byť jen zčásti) na základě Díla, úpravou Díla, spojením Díla s jiným dílem, zařazením Díla do díla souborného či spracováním Díla (včetně překladu), licenci alespoň ve výše uvedeném rozsahu a zároveň zpřístupnit zdrojový kód takového díla alespoň srovnatelným způsobem a ve srovnatelném rozsahu, jako je zpřístupněn zdrojový kód Díla.

V Praze dne 23. května 2014

.....

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

© 2014 Josef Gečňuk. Všechna práva vyhrazena.

*Tato práce vznikla jako školní dílo na Českém vysokém učení technickém v Praze, Fakultě elektrotechnické. Práce je chráněna právními předpisy a mezinárodními úmluvami o právu autorském a právech souvisejících s právem autorským. K jejímu užití, s výjimkou bezúplatných zákonných licencí, je nezbytný souhlas autora.*

### **Odkaz na tuto práci**

Gečňuk, Josef. *Jednoduchý variometr pro paragliding*. Bakalářská práce. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, 2014.

---

# Abstrakt

Variometr je přístroj měřící vertikální rychlost na základě vyhodnocení časové změny statického tlaku vzduchu, která odpovídá časové změně výšky. Jedná se o klíčový přístroj v letectví. Při bezmotorovém létání a paraglidingu se jedná o nejdůležitější přístroj. Cílem této bakalářské práce je vytvoření funkčního hardwaru a softwaru jednoduchého variometru použitelného pro paragliding. Statický tlak je měřen pomocí barometrického senzoru a následně zpracován mikrokontrolérem. Navrhnutý a realizovaný variometr má více než dostatečné vlastnosti pro použití jako orientační přístroj při paraglidingu.

**Klíčová slova** variometr, mikrokontrolér, msp430, metoda nejmenších čtverců, vertikální rychlost, atmosferický tlak

---

# Abstract

A variometer is an appliance measuring vertical speed. It is based on evaluation of the time change of the static air pressure. That is modified accordingly to the time change of the height. The appliance has been recognized as a crucial one in aviation. A variometer is the most important device for paragliding and for motor-less flying. The aim of this thesis is developing functional hardware and software of the elementary variometer that can be used for paragliding. With a device of a barometric sensor, the static pressure is measured. Consequently it is processed by a micro-controller. The variometer that has been designed and realized possesses more than sufficient features for its prime use which is an orientation appliance for paragliding.

**Keywords** variometer, microcontroller, msp430, least squares, vertical speed, static air pressure



---

# Obsah

Úvod	1
<b>1 Současné řešení variometrů pro paragliding</b>	<b>3</b>
<b>2 Návrh</b>	<b>7</b>
2.1 Princip činnosti . . . . .	7
2.2 Mikrokontrolér MSP430 . . . . .	10
2.3 Barometrický senzor MS5611 . . . . .	14
2.4 Displej . . . . .	15
<b>3 Realizace</b>	<b>19</b>
3.1 Hardwarová část . . . . .	19
3.2 Softwarová část . . . . .	22
<b>4 Ekonomický rozbor</b>	<b>31</b>
<b>5 Dosažené výsledky</b>	<b>33</b>
<b>Závěr</b>	<b>35</b>
<b>Literatura</b>	<b>37</b>
<b>A Seznam použitých zkratk a symbolů</b>	<b>39</b>
<b>B Schéma zapojení variometru</b>	<b>43</b>
<b>C Seznam součástí</b>	<b>45</b>
<b>D Deska plošného spoje</b>	<b>47</b>
<b>E Obsah příloženého CD</b>	<b>49</b>



---

## Seznam obrázků

1.1	Ascent V1 . . . . .	4
1.2	Flytec 6005 . . . . .	4
1.3	Princip funkce variometru . . . . .	5
2.1	Blokové schéma variometru . . . . .	7
2.2	Metoda nejmenších čtverců . . . . .	9
2.3	Blokové schéma MSP430G2x53 . . . . .	13
2.4	Blokové schéma MS5611 . . . . .	14
2.5	MS5611 Doporučené zapojení SPI . . . . .	15
2.6	MS5611 závislost chyby tlaku . . . . .	16
2.7	Adresace paměti displeje . . . . .	17
3.1	Doporučené zapojení TPS9730 . . . . .	20
3.2	DPS senzoru . . . . .	21
3.3	Hardwarový debouncing . . . . .	21
3.4	Vývojový diagram programu 1.část . . . . .	22
3.5	Vývojový diagram programu 2.část . . . . .	23
3.6	Resetovací sekvence senzoru . . . . .	24
3.7	Zpracování výšky klouzavým průměrem . . . . .	26
3.8	Závislost výšky na atmosferickém tlaku při standarní atmosféře . . . . .	26
3.9	Mód časovače TA1 . . . . .	28
3.10	Nastavení zvukové indikace . . . . .	28
5.1	Test variometru ve výtahu . . . . .	34
B.1	Schéma zapojení senzoru . . . . .	43
B.2	Schéma zapojení . . . . .	44
D.1	Tištěný spoj vrchní strana . . . . .	47
D.2	Tištěný spoj spodní strana . . . . .	47
D.3	Tištěný spoj deska senzoru . . . . .	48

D.4	Osazovací plán vrchní strana . . . . .	48
D.5	Osazovací plán spodní strana . . . . .	48
D.6	Osazovací plán deska senzoru . . . . .	48

---

## Seznam tabulek

2.1	Adresovatelný prostor MSP430 . . . . .	10
2.2	Displej instrukční sada . . . . .	16
3.1	Rozmístění pinů na DPS senzoru . . . . .	20
3.2	Rozmístění pinů displeje . . . . .	21
3.3	Kalibrační data . . . . .	25
4.1	Kalkulace jednotkové ceny výrobku . . . . .	32



---

# Úvod

Variometr je přístroj měřící vertikální rychlost na základě vyhodnocení časové změny statického tlaku vzduchu, která odpovídá časové změně výšky [1]. Jedná se o klíčový přístroj v letectví. Informace o vertikální rychlosti je zásadní při vzletu a přistání. Při bezmotorovém létání a paraglidingu se jedná o nejdůležitější přístroj.

Měření vertikální rychlosti může být řešeno mechanicky, pomocí pohyblivého křídélka. Další možnosti jsou: časovou derivací výšky, snímáním zrychlení a následného přepočtu a vyhodnocení, ze skutečné vzdušné rychlosti.

Cílem je vytvoření funkčního hardwaru a softwaru variometru použitelného pro paragliding. V tomto případě bude statický tlak měřen pomocí barometrického senzoru a následně zpracován mikrokontrolérem. Informace o vertikální rychlosti bude zobrazena na displeji, případně zvukovými signály. Rozměry, parametry a přesností je tento variometr určen pro použití při paraglidingu.

V první kapitole jsou porovnány současné variometry pro paragliding a jejich funkce. V kapitole návrh jsou popsány základní principy funkce variometru, výběr vhodných komponentů, jejich vlastností a použití. Kapitola realizace se zabývá implementací a propojením jednotlivých komponentů. Dále je v této kapitole rozebrán kompletní princip funkce variometru. V kapitole ekonomický rozbor je provedena kalkulace ceny výrobku v případě výroby. Kapitola dosažené výsledky obsahuje naměřené hodnoty a porovnání parametrů variometru s komerčně vyráběnými přístroji.





# Současné řešení variometrů pro paragliding

Na trhu se v současné době vyskytuje řada modelů variometrů určených pro paragliding. Mezi nejrozšířenější značky u nás patří Brauniger, Flytec, Digifly a Ascent. K jednodušším zařízením v této kategorii patří ascent v1 viz obr.1.1. Je vybaven jedním tlakovým senzorem a malým displejem. Cena základních modelů s displejem začíná na 5000 Kč.

Pokročilejší zařízení obsahují více barometrických čidel pro zobrazení více nezávislých hodnot. Například absolutní, relativní nebo nadmořské výšky. Dále pak mohou obsahovat analogový variometr, případně jsou doplněny systémem GPS nebo mají možnost připojení rychlostní sondy. Příkladem takového přístroje je Flytec 6005 viz. obr.1.2

K dostání jsou také audio variometry, které jsou určeny k montáži na helmu. Typickým zástupcem je Flytec IQ Sonic. Tyto přístroje nemají displej ani ovládací prvky. Používají se zejména pro svahové létání, kde není nutnost sledovat nadmořskou výšku, nebo jako záložní přístroje. Pořizovací cena audio variometru je 3000 Kč.

Variometr Ascent v1 má následující specifikace:

Výškoměr: Teplotní korekce, absolutní a relativní, rozlišení 1 m

Variometr: Průměrovaná hodnota s rozlišením  $0,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , nastavitelná hlasitost, Nastavitelný alarm klesání

Teplota: Rozlišení  $1 \text{ }^\circ\text{C}$

Záznam: až 200 záznamů předchozích letů, startovní, maximální a konečná výška, maximální průměrované stoupání a maximální klesání

Displej: Černobílý s rozlišením 128 x 64 px

## 1. SOUČASNÉ ŘEŠENÍ VARIOMETRŮ PRO PARAGLIDING

---



Obrázek 1.1: Ascent V1



Obrázek 1.2: Flytec 6005

Baterie: 320 mAh dobíjecí lithium polymerová baterie, až 10 hodin provozu, indikátor nabíjení

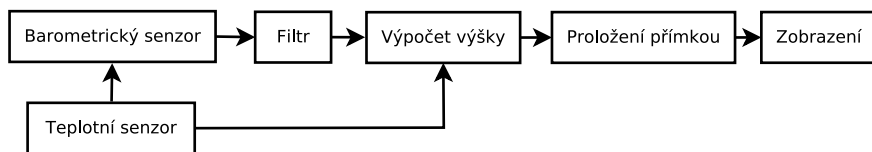
Rozměry: 44 mm x 60 mm x 16 mm

Váha: 40 g [2]

Elektronické variometry vypočítávají vertikální rychlost z barometrického tlaku. Surová data ze senzoru jsou zatížena šumem a oscilují kolem skutečné hodnoty. Použitím filtru tento šum odstraníme. Nejjednodušší příklad filtru v těchto aplikacích je klouzavý průměr, ve většině případů se setkáme s filtrem s nekonečnou impulzní odezvou. Dále je používán Kalmanův filtr nebo alfa beta filtr.

Hodnota tlaku je přepočítána dle barometrické rovnice na výšku. Podle použitého barometrického senzoru je hodnota kalibrována pro aktuální teplotu.

Série hodnot výšky je proložena přímkou, podle velikosti časového okna je průběh vyhlazen. Dle zvoleného nastavení je údaj o vertikální rychlosti zobrazen či jinak indikován. Principiální funkce variometru viz. obr. 2.3



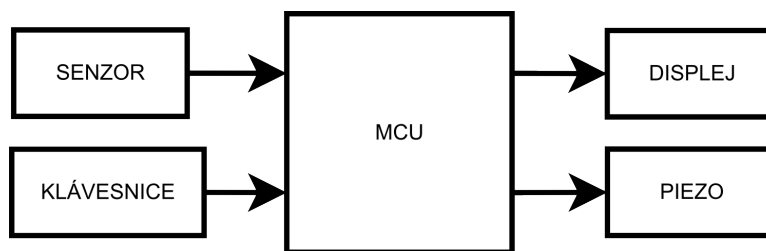
Obrázek 1.3: Princip funkce variometru

Při použití barometrického senzoru s digitálním výstupem a zabudovaným teplotním senzorem odpadne nutnost použití dalších obvodů, dosáhneme tak menší spotřeby. Veškeré operace bude zpracovávat mikrokontrolér. Jako filtr hodnot bude použit jednoduchý klouzavý průměr. Tlak se bude přepočítávat na výšku pomocí tabulky pro standardní atmosféru a výsledné hodnoty budou prokládány metodou nejmenších čtverců.



## Návrh

Kapitola návrh se zaměřuje na popsání použitých principů a vhodný výběr součástí pro stavbu přístroje. Navrhovaný variometr se bude skládat z těchto bloků viz. obr. 2.1.



Obrázek 2.1: Blokové schéma variometru

### 2.1 Princip činnosti

Tato část se zabývá měřením tlaku, způsobem určení výšky z hodnoty tlaku a následným zpracováním výšky pro získání vertikální rychlosti.

#### 2.1.1 Měření tlaku

Barometrický senzor snímá v pravidelných intervalech údaj o atmosferickém tlaku, což je hmotnost vzduchového sloupce. Atmosferický tlak se mění se změnou výšky. S větší výškou klesá hmotnost tohoto sloupce a atmosferický tlak také klesá. Atmosferický tlak je také závislý na teplotě a zeměpisné šířce. Druhou veličinu budeme moci v našem případě zanedbat, nebudeme se s naším zařízením přesouvat na takové vzdálenosti v jednom měření. V krátkodobém horizontu závislost atmosferického tlaku na teplotě nepředstavuje velký problém. Při delším používání bez kalibrace tato odchylka od nadmořské výšky může být v řádech desítek metrů. Tento problém můžeme vyřešit pravidelnou

kalibrací. Barometrické snímání výšky je v tomto ohledu mnohem přesnější než systém GPS.

### 2.1.2 Přepočet tlaku na výšku

Výšku je možné stanovit díky známé závislosti statického absolutního tlaku na výšce. Tato závislost je exponenciální a je stanovena barometrickou rovnicí. Výpočet výšky vychází z barometrické rovnice, odvození lze najít zde [1]

$$H = \frac{T_0}{-dH/dT} \left[ 1 - \left( \frac{P}{P_0} \right)^{-dT/dH \cdot R/g} \right] \quad (2.1)$$

kde

$H$  - absolutní výška od mořské hladiny [m]

$P$  - tlak ve výšce  $H$  [Pa]

$P_0$  - tlak v nulové výšce 101325 [Pa]

$T_0$  - teplota v nulové výšce 288,15 [K]

$R$  - plynová konstanta pro vzduch 287,052 [ $m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$ ]

$dT/dH$  - teplotní koeficient do výšky 11 km  $-6,5 \cdot 10^{-3}$  [ $K \cdot m^{-1}$ ]

$g$  - gravitační konstanta 9,82 [ $m \cdot s^{-2}$ ]

Při použití v rozsahu absolutní výšky  $H$  od 0 do 11 km a dosazení hodnot pro standartní atmosféru, se vztah upraví na tvar:

$$H = 443300 \left[ 1 - \left( \frac{P}{101325} \right)^{0,19} \right] \quad (2.2)$$

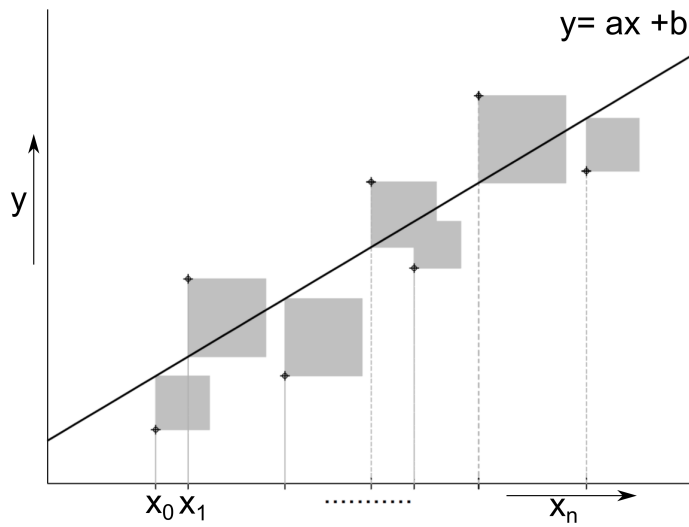
### 2.1.3 Klouzavý průměr

Jedna z nejjedušších metod filtrace je jednoduchý klouzavý průměr. Jedná se o aritmetický průměr posledních  $2m+1$  hodnot. S rostoucí délkou klouzavého průměru roste míra vyhlazení průběhu.

### 2.1.4 Metoda nejmenších čtverců

Pokud bychom odečítali výšku pouze ve dvou momentech, tak by vertikální rychlost byla zatížena velkou chybou způsobenou šumem senzoru nebo jeho malým pohybem. Proto je mnohem vhodnější hodnoty aproximovat. Toho lze dosáhnout pomocí metody nejmenších čtverců.

Předpokládáme rovnoměrný pohyb, proto hodnoty proložíme přímkou reprezentovanou rovnicí  $y = ax + b$ . Pro tuto přímku je součet obsahů čtverců



Obrázek 2.2: Metoda nejmenších čtverců [3]

minimální. viz. obr. 2.2 Čím více hodnot proložíme, tím bude rychlost stoupání určena přesněji. [3] Směrnice této nalezené přímky je přímo úměrná rychlosti stoupání. Je tedy nutné ji normovat na počet vzorků a získáme údaj o stoupání v  $m \cdot s^{-1}$ . Směrnici přímky odvodíme z této soustavy rovnic.

$$a \sum x_i^2 + b \sum x_i = \sum x_i y_i \quad (2.3)$$

$$a \sum x_i + b n = \sum y_i \quad (2.4)$$

Tabulka 2.1: Adresovatelný prostor MSP430 [4]

1FFFFh	Flash/ROM	Word/Byte
10000h		
0FFFFh	Interrupt Vector Table	Word/Byte
0FFE0h		
0FFDFh	Flash/ROM	Word/Byte
0200h	RAM	Word/Byte
01FFh		
0100h	16-Bit Peripheral Modules	Word
0FFh		
010h	8-Bit Peripheral Modules	Byte
0Fh		
0h	Special Function Registers	Byte

## 2.2 Mikrokontrolér MSP430

Pro tuto aplikaci jsem vybral mikrokontrolér MSP430G2553 od výrobce Texas instruments. Jedná se o levný, 16 bitový RISC kontrolér schopný pracovat až do frekvence 16 MHz. Tento mikrokontrolér je vhodný pro široké spektrum aplikací. Je používán zejména v zařízeních napájených bateriově, díky malé spotřebě a přítomnosti úsporných módů.

MSP430 má von-Neumannovu architekturu. Používá se tedy jeden společný adresovatelný prostor sdílený se speciálními registry, vektory přerušeni, flash pamětí, RAM a perifériemi viz. obr.2.1.[4]

### 2.2.1 CPU

Mikroprocesor má 16 bitovou RISC architekturu a je integrován s 16 registry, což snižuje dobu provedení operace. Operace registr-registr trvá jeden hodinový cyklus mikroprocesoru. První čtyři registry R0 až R3 jsou určeny jako program counter, stack pointer, status register a constat generator. Ostatní registry jsou univerzální.

Program Counter ukazuje na další instrukci, která má být provedena procesorem. Po provedení se Program Counter zvýší o velikost instrukce.



Stack Pointer je používán procesorem k uložení návratové adresy volání a přerušení.

Status Register neobsahuje narozdíl od předchozích číslo, jedná se o registr příznaků. Příznakové bity v tomto registru jsou tyto: Carry bit, Zero bit, Negative bit, General interrupt enable, CPU off, Oscillator off, System clock generator 0, System clock generator 1, Overflow bit

Constant Generator Registers je šest často používaných konstat generovaných z registru R2 a R3 bez nutnosti dalšího 16 bitového slova kódu.

Instrukční set obsahuje 27 instrukcí a je možné je rozdělit do tří typů: Instrukce s jedním operandem, instrukce s dvěma operandy, podmíněné instrukce.[4]

### 2.2.2 Základní modul hodin

Poskytuje hodinový signál mikrokontroléru. Hodinový modul zahrnuje 4 hodinové zdroje.

- LFXT1CLK - Nízkofrekvenční / vysokofrekvenční osilátor, který může být použit s nízkofrekvenčními hodinovými krystaly nebo externím hodinovým zdrojem 32768 Hz nebo se standardními krystaly, rezonátory nebo externími zdroji o frekvenci v rozmezí od 400 kHz do 16 MHz.
- XT2CLK - Volitelný vysokofrekvenční oscilátor, který může být použit se standardními krystaly, rezonátory nebo externími zdroji o frekvenci v rozmezí od 400 kHz do 16 MHz.
- DCOCLK - Vnitřní digitálně řízený oscilátor.
- VLOCLK - Vnitřní nízkofrekvenční oscilátor s malou spotřebou a typickou frekvencí 12 kHz.[4]

Následující 3 hodinové signály jsou dostupné ze základního modulu hodin.

- ACLK - Pomocné hodiny, jako zdroj je možné použít LFXT1CLK nebo VLOCLK. Tyto hodiny mohou využívat periférie.
- MCLK - Hlavní hodiny, zdroj může být libovolný. Tyto hodiny používá CPU.
- SMCLK - Vedlejší hodiny, zdroj může být libovolný. Tyto hodiny mohou využívat periférie.

Nastavení frekvenční děličky se provádí přepsáním registru, všechny tyto hodinové signály mohou být děleny /1, /2, /4, /8.[4]

### 2.2.3 Periférie

Mikrokontrolér obsahuje velké množství periférií, většina z nich jsou samostatné a nezatěžují procesor. V této části stručně popíšeme periférie, které budeme dále používat.

V první řadě se neobejdeme bez vstupně výstupních portů. MSP430G2553 v pouzdře DIL20 má 2 porty. Oba dva porty P1 a P2 jsou 8 bitové. Dle nastavení registrů můžeme volit na pinech výstupní logickou úroveň nebo čistě vstupní logickou úroveň. Všechny piny mají integrované pullup/pulldown rezistory, které můžeme ovládat. Oba porty mohou generovat přerušování. Dále je možné k pinům připojovat ostatní periférie. Nastavení a čtení portů probíhá za pomoci následujících registrů:

- PxDIR - Nastavení vstup logická 0/ výstup logická 1
- PxIN - Aktuální vstupní logická hodnota
- PxOUT - Nastavení logické hodnoty na výstupu
- PxSEL, PxSEL2 - Kombinace bitů určuje jaká periférie se na daný pin připojí.[4]

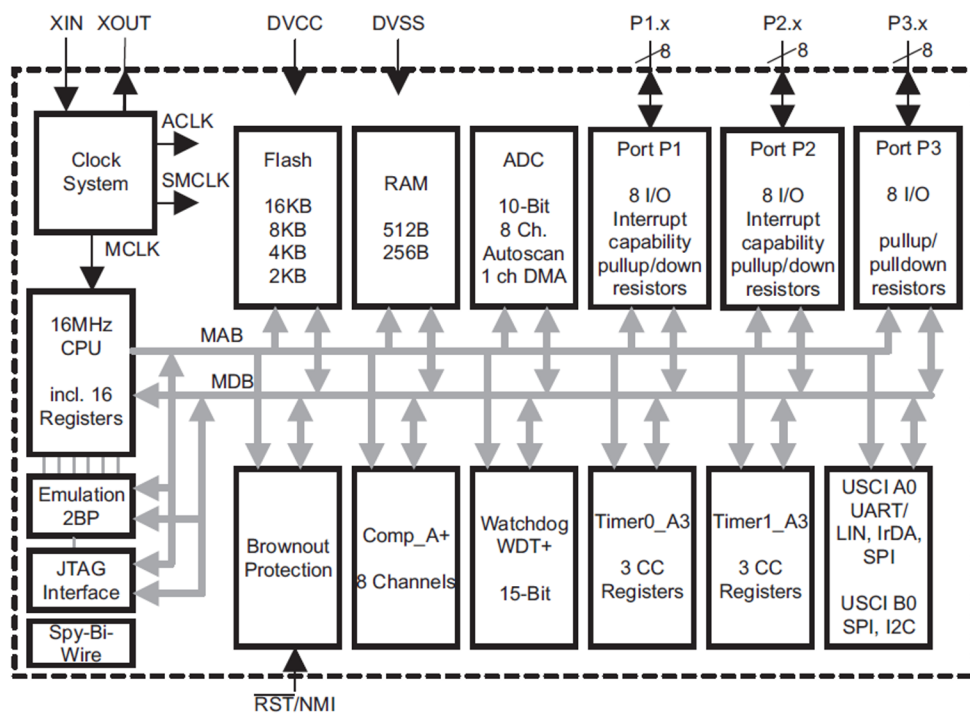
MSP430 obsahuje 2 samostatné 16 bitové časovače Timer0A a Timer1A. Zdrojem hodinového signálu může být ACLK nebo SMCLK. Časovače mohou pracovat v následujících módech.

- Up - kdy čítá od nuly do hodnoty registru TACCR0
- Continuous - kdy opakovaně čítá od nuly po 0xFFFF
- Up/Down - kdy čítá od nuly po hodnotu registru TACCR0 a pak zpět do nuly.[4]

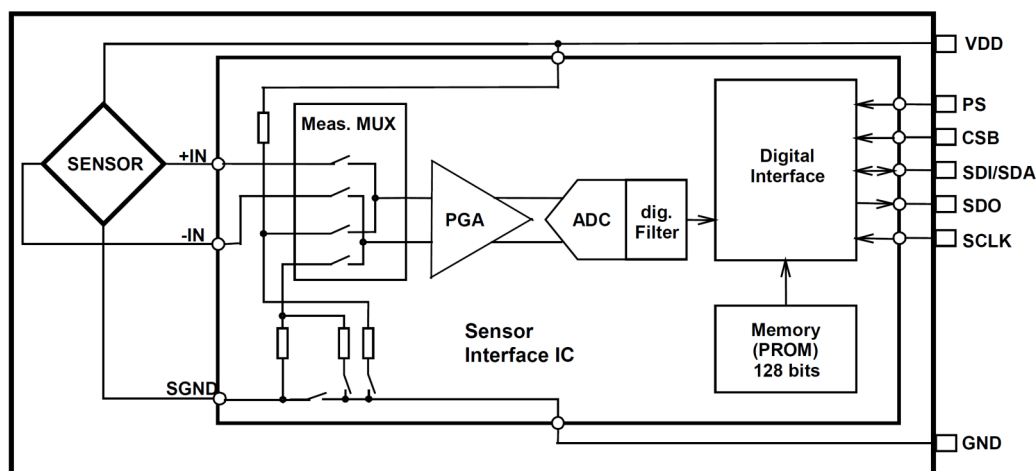
Analogově digitální převodník obsažený v mikrokontroléru je 10 bitový. Jako referenční napětí je možné využívat napájecí napětí, interně generované napětí 1,5 V nebo 2,5 V, případně externí napětí. Hodnotu převodu ukládá nezávisle na procesoru.[4]

Komunikaci po sběrnících umožňují dva nezávislé USCI moduly. Pomocí USCI A je možné komunikovat po UART nebo SPI, pomocí USCI B je možné komunikovat po IIC nebo SPI.

Mikrokontrolér je možné programovat díky Spy-Bi-Wire pomocí pohých dvou vodičů. K programování může sloužit například vývojový kit MSP-EXP430G2.



Obrázek 2.3: Blokové schéma MSP430G2x53 [5]



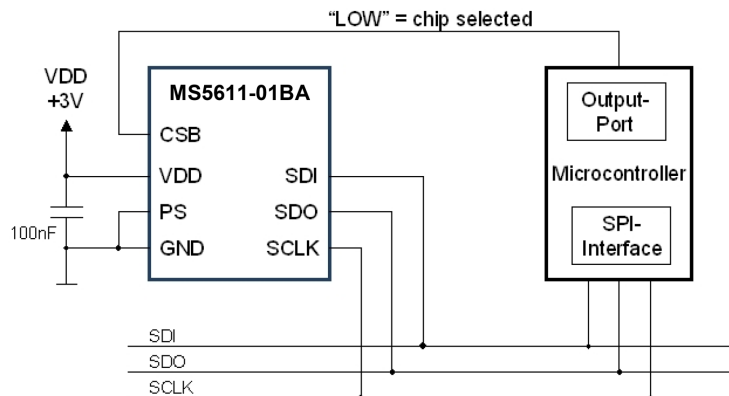
Obrázek 2.4: Blokové schéma MS5611 [6]

### 2.3 Barometrický senzor MS5611

Pro použití barometrického čidla ve variometru je kladen důraz zejména na vysokou vzorkovací frekvenci a velké rozlišení. Dále pak také na malé rozměry a nízkou spotřebu. Všechna tato kritéria splňuje čidlo MS5611-01BA03, je přímo určeno pro takovou aplikaci. Čidlo má následující specifikace:

- Rozlišení 10 cm
- Rychlá konverze méně než 1 ms
- Nízká spotřeba 1 uA (standby mód < 0,15 uA)
- QFN pouzdro 5 x 3 x 1 mm
- Napájecí napětí 1,8 V až 3,6 V
- Integrovaný digitální tlakový senzor (24 bitový ADC)
- Rozhraní IIC/SPI 20 MHz
- Není třeba externích komponentů
- Dlouhodobá stabilita [6]

MS5611 obsahuje piezo rezistivní senzor. Nekompenzovaná hodnota výstupního napětí senzoru se převede pomocí 24 bitového převodníku. V paměti PROM je uloženo 6 kalibračních koeficientů, po jejich zahrnutí do výpočtu v mikrokontroléru dostaneme kalibrovanou hodnotu. Použití sběrnice se volí pomocí přivedení logické jedničky nebo nuly na pin PS (Protocol select).



Obrázek 2.5: Doporučené zapojení SPI [6]

V případě použití sběrnice SPI přivedeme na pin PS logickou nulu. Jelikož jsme schopni vyčíst ze senzoru teplotu, není třeba doplňovat MS5611 dalším teplotním čidlem kvůli teplotní kompenzaci. Doba převodu závisí na zvolené přesnosti. Nejvyšší přesnost je 0,012 mbar, doba převodu v tomto případě je typicky 8,22 ms. To je více než dostatečné. V době převodu je vhodné přerušit veškerou komunikaci na sběrnici, zabrání se tak vzniku nepřesností.[6]

Senzor má pouze pět základních příkazů:

- Reset
- Přečtení PROM (128 bitů)
- Konverze D1 (tlak)
- Konverze D2 (teplota)
- Přečtení výsledku převodu (24 bitová hodnota tlaku/teploty)

Doporučené zapojení pro použití sběrnice SPI je následující viz. obr.2.5

Chybu měření tlaku je možné minimalizovat zvolením vhodného napájecího napětí senzoru viz. obr.2.6

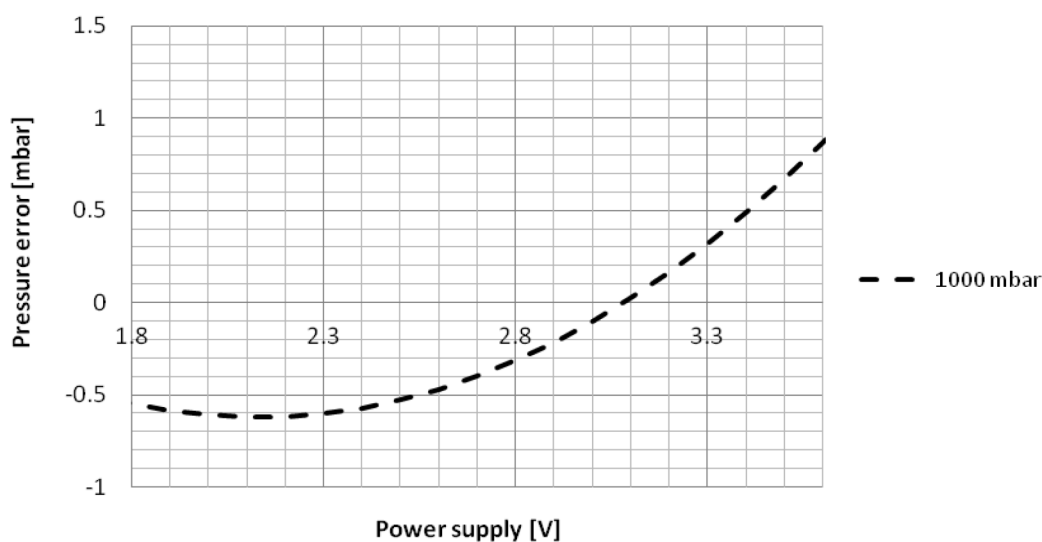
## 2.4 Displej

Požadavky na displej jsou následující: Nesegmentový displej pro možnost zobrazení bargrafu, dobrá čitelnost, malá spotřeba, komunikace po malém počtu vodičů.

Těmto požadavkům vyhovuje displej s ovladačem PCD8544. PCD8544 je CMOS LCD ovladač k displeji s nízkou spotřebou, všechny důležité funkce nutné pro fungování displeje jsou na čipu, výsledkem je minimální počet externích komponentů.[7]

## 2. NÁVRH

### Pressure error vs supply voltage (typical)

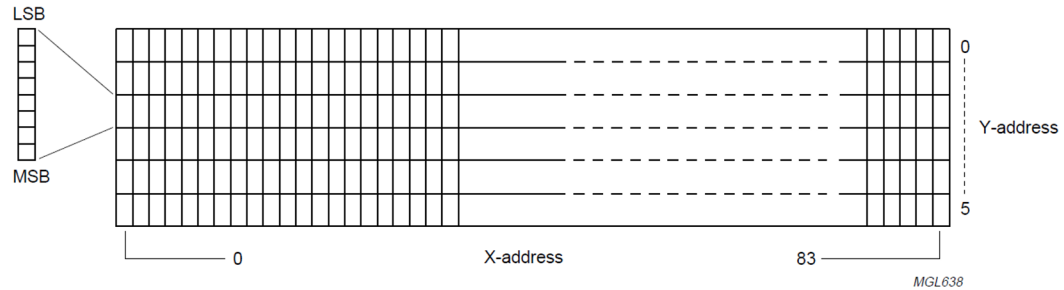


Obrázek 2.6: Závislost chyby měření tlaku na napájecím napětím [6]

Tabulka 2.2: Instrukční sada displeje [7]

INSTRUCTION	D/ $\bar{C}$	COMMAND BYTE								DESCRIPTION	
		DB7	DB6	DB5	DB4	DB3	DB2	DB1	DB0		
<b>(H = 0 or 1)</b>											
NOP	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	no operation
Function set	0	0	0	1	0	0	PD	V	H		power down control; entry mode; extended instruction set control (H)
Write data	1	D <sub>7</sub>	D <sub>6</sub>	D <sub>5</sub>	D <sub>4</sub>	D <sub>3</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>0</sub>		writes data to display RAM
<b>(H = 0)</b>											
Reserved	0	0	0	0	0	0	1	X	X		do not use
Display control	0	0	0	0	0	1	D	0	E		sets display configuration
Reserved	0	0	0	0	1	X	X	X	X		do not use
Set Y address of RAM	0	0	1	0	0	0	Y <sub>2</sub>	Y <sub>1</sub>	Y <sub>0</sub>		sets Y-address of RAM; 0 ≤ Y ≤ 5
Set X address of RAM	0	1	X <sub>6</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>0</sub>		sets X-address part of RAM; 0 ≤ X ≤ 83
<b>(H = 1)</b>											
Reserved	0	0	0	0	0	0	0	0	1		do not use
Reserved	0	0	0	0	0	0	0	1	X		do not use
Temperature control	0	0	0	0	0	0	1	TC <sub>1</sub>	TC <sub>0</sub>		set Temperature Coefficient (TC <sub>x</sub> )
Reserved	0	0	0	0	0	1	X	X	X		do not use
Bias system	0	0	0	0	1	0	BS <sub>2</sub>	BS <sub>1</sub>	BS <sub>0</sub>		set Bias System (BS <sub>x</sub> )
Reserved	0	0	1	X	X	X	X	X	X		do not use
Set V <sub>OP</sub>	0	1	V <sub>OP6</sub>	V <sub>OP5</sub>	V <sub>OP4</sub>	V <sub>OP3</sub>	V <sub>OP2</sub>	V <sub>OP1</sub>	V <sub>OP0</sub>		write V <sub>OP</sub> to register

Obrázek 2.7: Adresace paměti displeje [7]



Používal se ve starších mobilních telefonech, například v Nokii 3110. Tento displej je velice dobře dostupný a narozdíl od jiných je k němu dobře zpracovaná dokumentace. Rozlišení tohoto displeje je 48 x 84 pixelů. Displej je černobílý. Použitá technologie je LCD. Displej je určen pro komunikaci po SPI. To vyhovuje kritériu malého počtu ovládacích vodičů.

Zobrazovaná data jsou ukládána do DDRAM. Paměť je rozdělena na 6 bank po 84 bytech. Adresování probíhá tedy v X ose v rozsahu od 0 do 83, v Y ose od 0 do 5 viz. 2.7

Instrukce může být dvojího druhu. Buď data nebo příkaz a to podle stavu pinu D/C. Pokud je pin D/C v logické jedné, jsou ukládána data do paměti DDRAM viz. 2.2. Po každém zapsání se adresový čítač posune na další pozici.

Při zapnutí displeje je nutné přivést pulz na pin RES, aby nedošlo k poškození ovladače.





---

## Realizace

Kapitola realizace se zabývá implementací vybraných komponentů, a to jak po hardwarové, tak po softwarové stránce. Cílem je vytvoření funkčního celku.

### 3.1 Hardwarová část

Tato část je zaměřená na realizaci vhodného propojení jednotlivých částí variometru. Dále pak na návrh podpůrných obvodů zaručujících správnou funkci celého zařízení.

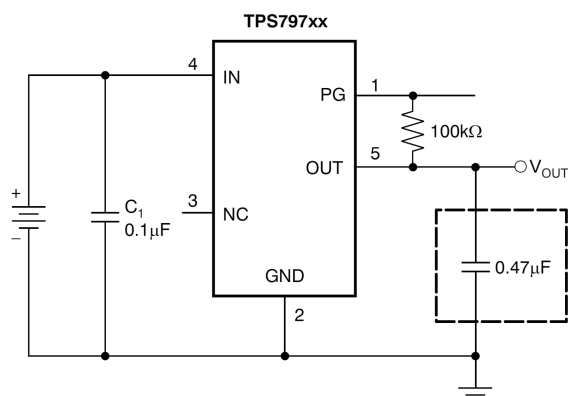
#### 3.1.1 Napájení

Jako zdroj napětí je použita lithium iontová baterie Nokia BL-5C s kapacitou 1020 mAh a nominálním napětím 3,7 V. Napětí baterie se může měnit v rozsahu od 3 V do 4,2 V. Samovybíjení je u Li-ion článků menší než 5 % za měsíc, životnost dosahuje 1000 cyklů podle používání, nemá paměťový efekt a vyznačuje se vysokou hustotou energie. [8]

Mikrokontrolér MSP430 je schopný fungovat v rozsahu 1,8 V až 3,6 V, stejný rozsah hodnot napájecího napětí má i použitý tlakový senzor MS5611. Ovladač displeje funguje od 2,7 V do 3,3 V. Vzhledem k tomu, že se jedná o mobilní aplikaci, kde bude spotřeba hrát velkou roli, budeme se snažit snížit napětí na přijatelnou mez. Tlakový senzor dosahuje nejmenší chyby měření tlaku a teploty právě v rozsahu 3 V až 3,1 V viz. obr. 2.6 Proto bude vhodné nastavit napájecí napětí na tuto hodnotu.

Toho bylo docíleno použitím regulátoru napětí s malým odstupem vstupního a výstupního napětí (LDO). LDO TPS79730 je regulátor napětí určený pro mobilní aplikace, vyžaduje minimální počet součástek viz. obr. 3.1 a zabírá malé místo na desce. Důležité parametry:

- Maximální výstupní proud 50 mA
- Výstupní napětí 3 V



Obrázek 3.1: Doporučené zapojení TPS9730 [9]

- Rozsah vstupního napětí 1,8 V až 5,5 V
- Klidový proud 1,2  $\mu\text{A}$
- Ztrátové napětí 110 mV při 10 mA[9]

Pokud napětí baterie klesne pod 2,8 V, nemusí být její opětovné nabití proveditelné. Proto je vhodné měřit aktuální napětí na baterii. Toho docílíme přivedením napětí baterie na analogový vstup mikrokontroléru. Jelikož napětí na vstupu mikrokontroléru nesmí přesáhnout 3,3 V, byl mezi baterii a vstup vložen dělič napětí. Dělič je složen ze dvou odporů 100 k $\Omega$ . Proud děličem při plném napájecím napětí 4,2 V bude 41  $\mu\text{A}$ . Napětí na analogovém vstupu mikrokontroléru bude poloviční, oproti napětí na baterii.

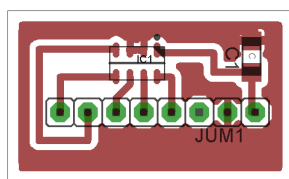
Spotřeba variometru bez zapnutého podsvícení a piezo měniče je velice nízká, proud  $I < 0,8 \text{ mA}$ . Při zapnutí podsvícení displeje a piezo měniče narůstá na 3,1 mA. Vario na jedno nabití baterie tak vydrží více jak 100 hodin provozu podle daného nastavení.

### 3.1.2 Senzor

Tlakový senzor má pouzdro QFN. Kvůli lepší přístupnosti pinů a ladění byl umístěn na samostatnou desku. Na desce je umístěn kondenzátor 100 nF pro stabilizaci napájecího napětí senzoru a pin PS je přiveden na zem, takto je senzor nastaven pro komunikaci po SPI. viz. obr. 3.2. Rozmístění pinů je následující viz. obr. 3.1

Tabulka 3.1: Rozmístění pinů DPS senzoru

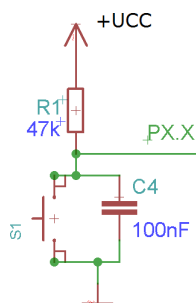
1	2	3	4	5	6	7	8
CS	CS	MISO	MOSI	CLK	NC	GND	UCC



Obrázek 3.2: DPS senzoru

Tabulka 3.2: Rozmístění pinů displeje

1	2	3	4	5	6	7	8
RST	CS	D/C	MOSI	CLK	UCC	LIGHT	GND



Obrázek 3.3: Hardwarový debouncing

### 3.1.3 Displej

Displej i jeho ovladač jsou umístěny na jedné desce, ta se k hlavnímu plošnému spoji připojí pomocí patice. Komunikace probíhá po SPI, volba zařízení se volí pomocí chip selectu. Piny RST, D/C a LIGHT jsou připojeny k univerzálním pinům mikrokontroléru. Mezi pin LIGHT a mikrokontrolér je zapojen odpor 100  $\Omega$ , kvůli omezení proudu protékajícími elektroluminescenčními diodami podsvícení displeje. viz.tab. 3.2

### 3.1.4 Tlačítka

Pro snadnější manipulaci v rukavicích byla vybrána tlačítka P-DT6. Tlačítka jsou aktivní v logické nule. Hodnotu na vstupních pinech určují externí pull up rezistory. Paralelně k tlačítku je připojen kondenzátor o velikosti 100 nF, kvůli vyhlazení zákmitů tlačítka viz. obr. 3.3.

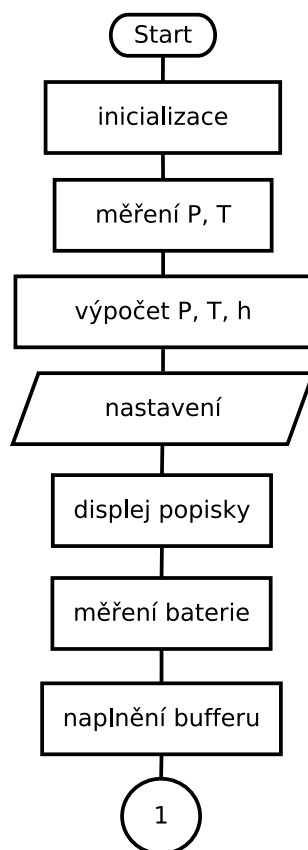
### 3.1.5 Piezo

Piezo měnič je připojen na pin, který je možné ovládat přímo časovačem. Na výstupním pinu mikrokontroléru by se nemělo vyskytnout napětí větší než

3,3 V. K tomu by mohlo dojít vytvořením napětí na piezu. Proto je paralelně k měniči připojena zenerova dioda, která omezí napětí na výstupu mikrokontroléru.

## 3.2 Softwarová část

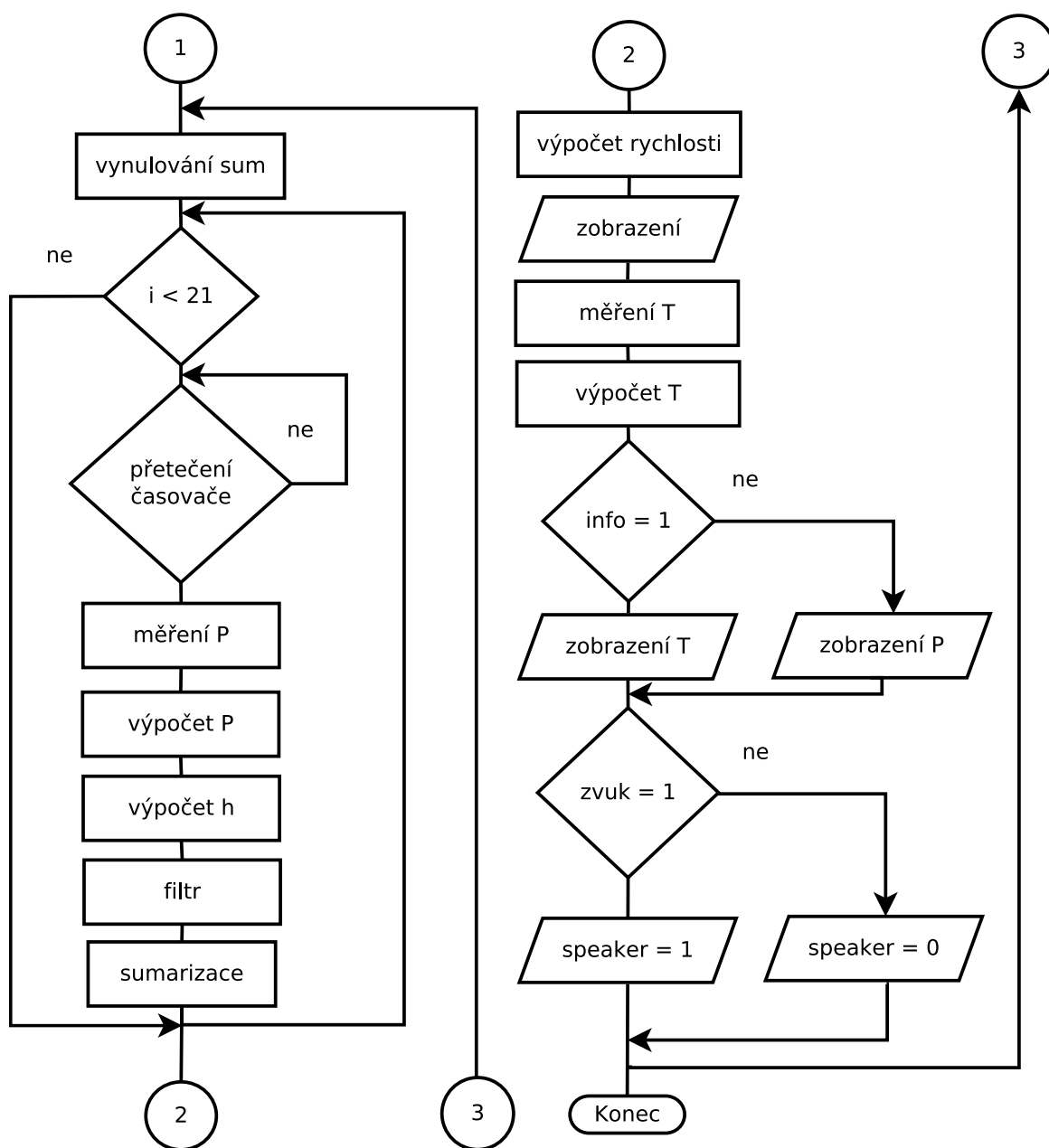
Celý kód program byl vytvořen v jazyku C ve vývojovém prostředí Code Composer Studio 5.5. Program se skládá z hlavního programu (main.c), programu tlakového senzoru (MS5611.h), obsluhy displeje (display.h), obsluhy piezo měniče (audio.h), kódu pro komunikaci po UART (UART.h) a hlavičkového souboru s fonty a konstantami pro ovladač displeje (PCD8544.h). Funkce softwaru viz. obr.3.4 a 3.5



Obrázek 3.4: Vývojový diagram programu 1.část

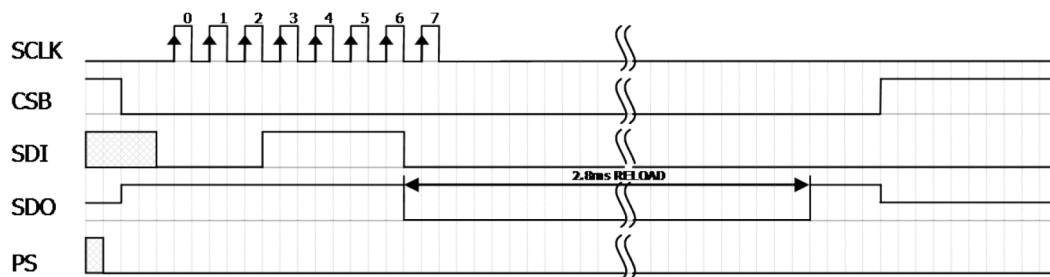
### 3.2.1 Komunikace po SPI

MSP430 obsahuje dva samostatné moduly USCI (Universal Serial Communication Interface). Pro sběrnici SPI použijeme modul USCI B. O nastavení



Obrázek 3.5: Vývojový diagram programu 2.část

### 3. REALIZACE



Obrázek 3.6: Resetovací sekvence senzoru [6]

modulu se stará funkce `initSPI(void)`. Nastaví, že jako první se posílá nejvýznamnější bit, mikrokontrolér nastaví na master, povolí synchronní mód. Dále určí, že hodnota je čtena při prvním přechodu změně hodinového signálu, nastaví komunikaci na délku 8 bitů a zvolí 3 pinové SPI. Jako zdroj hodinového signálu je určen SMCLK.

Komunikaci se senzorem obstarává funkce `writeToMS(unsigned char data)`. Funkce kontroluje vyprázdnění SPI výstupního bufferu a následně do něj zapíše data. Poté kontroluje vstupní buffer a jakmile je zaplněn, vrátí tato data jako návratovou hodnotu. Výběr zařízení (CS) probíhá v nadřazených funkcích, a to zejména kvůli dodržení klidu na sběrnici v době převodu měřené veličiny. Zamezí se tak vzniku nepřesnosti. Nejprve je odeslána resetovací sekvence, abychom zaručili přepsání koeficientů PROM do interních registrů viz. obr. 3.6. Poté jsou tyto kalibrační koeficienty vyčteny mikroprocesorem a následně již můžeme číst měřený tlak a teplotu. Tlak je čten s nejvyšším možným rozlišením 1,2 Pa.

Komunikace s displejem zajišťuje funkce, které předáváme 8 bitová data a informaci o tom, jestli se jedná o příkaz nebo o data, která se mají zobrazit. `writeToLCD(unsigned char dataCommand, unsigned char data)`. Podle toho se nastaví pin mikrokontroléru D/C. Po kontrole výstupního bufferu zvolíme jako zařízení s kterým chceme komunikovat displej a naplníme výstupní buffer. Poté co ověříme, že přenos proběhl, změním CS do logické 1 a tím přestaneme komunikovat se zařízením. Jako základ knihovny displeje byl použit následující kód [10], který byl upraven pro toto použití. Knihovna byla následně rozšířena a upravena o funkce pro zobrazení bargrafu, mazání sloupců, zobrazení velkého písma a rozmístění informací na displeji.

#### 3.2.2 Zpracování dat senzoru

Po obdržení kalibračních koeficientů C1- C6 viz. tab. a hodnot D1(Hodnota tlaku) a D2 (Hodnota teploty), můžeme vypočítat skutečné hodnoty tlaku (P) a teploty (TEMP).

Tabulka 3.3: Kalibrační data senzoru

C1	Citlivost tlaku
C2	Offset tlaku
C3	Teplotní koeficient citlivosti tlaku
C4	Teplotní koeficient offsetu tlaku
C5	Referenční teplota
C6	Teplotní koeficient teploty

Rozdíl aktuální a referenční teploty

$$dT = D2 - C5 \cdot 2^8 \quad (3.1)$$

Skutečná teplota v celočíselném formátu ( 2007 = 20,07 °C )

$$TEMP = 2000 + dT \cdot C6/2^{23} \quad (3.2)$$

Offset tlaku při aktuální teplotě

$$OFF = C2 \cdot 2^{16} + (C4 \cdot dT)/2^7 \quad (3.3)$$

Citlivost při aktuální teplotě

$$SENS = C1 \cdot 2^{15} + (C3 \cdot dT)/2^8 \quad (3.4)$$

Teplotně kompenzovaný tlak v celočíselném formátu ( 100009= 1000,09 mbar )

$$P = (D1 \cdot SENS/2^{11} - OFF)/2^{15} \quad (3.5)$$

Tyto výpočty provádějí funkce `vypocetTlakP(void)` a `vypocetTeploty(void)`. Pro zmenšení náročnosti výpočtu jsou mocniny dvou realizovány jako bitový posun. Výsledek těchto operací je v jazyku C ekvivalentní, avšak liší se výpočetní náročností.

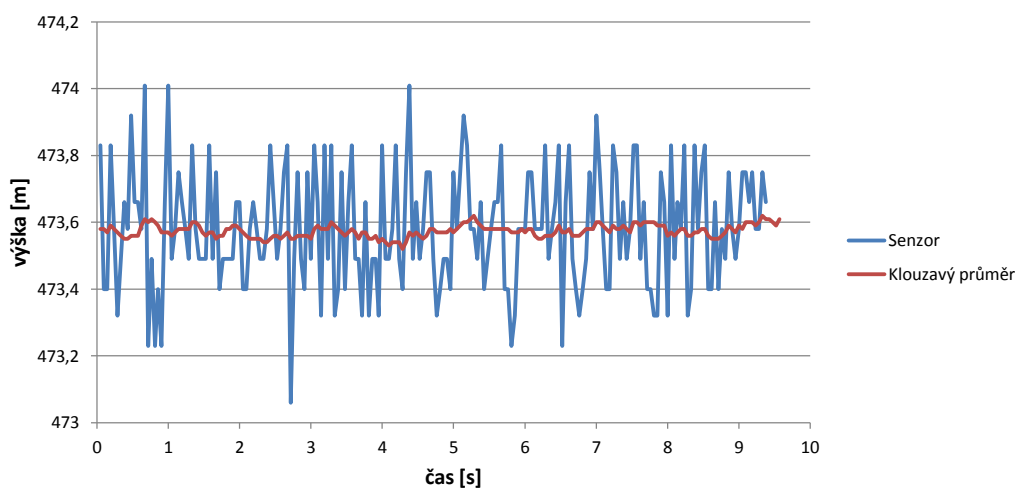
$x \ll n = x \cdot 2^n$ , obdobně  $x \gg n = x \% 2^n$ , kde `%` je operátor celočíselného dělení. Je nutné vhodně zvolit datový typ proměnné, aby nedošlo k přetečení. Tlak je ze senzoru vyčítán s frekvencí 21 Hz v módu největší přesnosti. Teplota s frekvencí 1 Hz.

### 3.2.3 Výpočet výšky

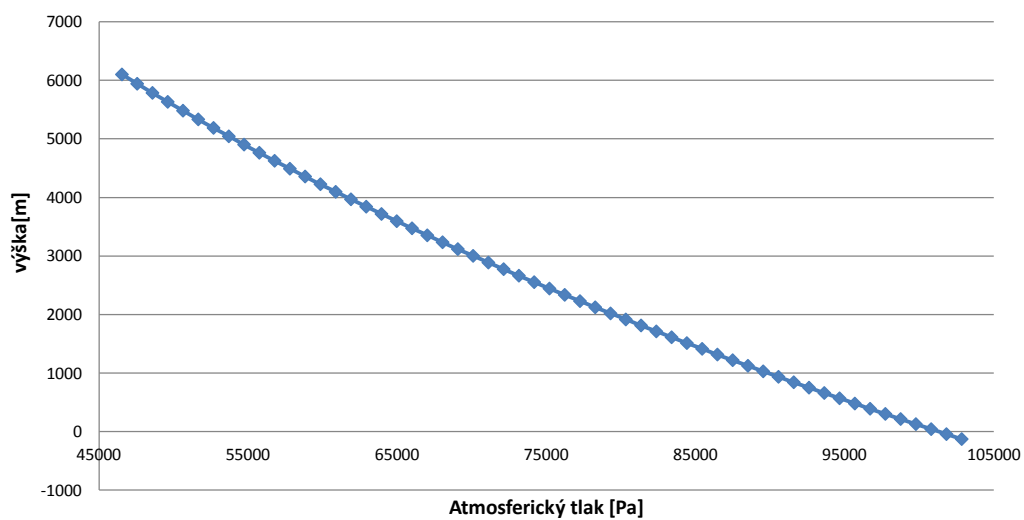
Přímý přepočítání tlaku na výšku z barometrické rovnice je výpočetně náročný. Proto je v tomto případě mnohem vhodnější vytvoření tabulky závislosti tlaku na výšce.

Hodnoty výšky jsou vypočítány pro parametry standardní atmosféry, tabulka je odstupňovaná po 1024 Pa od maximálního tlaku 102860 Pa po minimální tlak 46540 Pa, který odpovídá výšce 6100 m viz. obr. 3.8. Tímto způsobem jsme pokryli rozsah použití přístroje a rapidně snížili čas a potřebnou

### 3. REALIZACE



Obrázek 3.7: Zpracování výšky klouzavým průměrem



Obrázek 3.8: Závislost výšky na atmosferickém tlaku při standartní atmosféře

paměť nutnou k výpočtu výšky. Výška je ukládána v centimetrech z důvodu lepší proveditelnosti a časové náročnosti celočíselných operací.

Nyní aktuální výšku zpracujeme klouzavým průměrem, tím odfiltrujeme šum a získáme hodnoty vhodné pro výpočet rychlosti viz. obr. 3.7.



### 3.2.4 Výpočet rychlosti

Vertikální rychlost je aproximována metodou nejmenších čtverců. Po každém měření provádíme dílčí výpočty a sčítáme aktuální hodnoty s předchozími. Jakmile máme sumu 21 hodnot, vypočítáme směrnici přímky. Směrnice přímky se vypočítá z následující rovnice. Do rovnice přímky dosadíme hodnotu  $x$  v čase jedné sekundy a získáme vertikální rychlost s rozměrem  $cm \cdot s^{-1}$ .

$$a = \frac{n \sum xy - \sum y \sum x}{n \sum x^2 - \sum x \sum x} \quad (3.6)$$

### 3.2.5 Zobrazení

Komunikace s displejem probíhá po sběrnici SPI společně se senzorem. Pokud jsou posílána data, nastaví pin D/C do logické jedna, pro příkaz do logické nula. Po vyprázdnění bufferu nastaví CS2 do logické nuly a odešle data. Jakmile je výstupní buffer prázdný, nastaví CS2 do logické jedna, aby v tomto čase mohl komunikovat mikrokontrolér se senzorem.

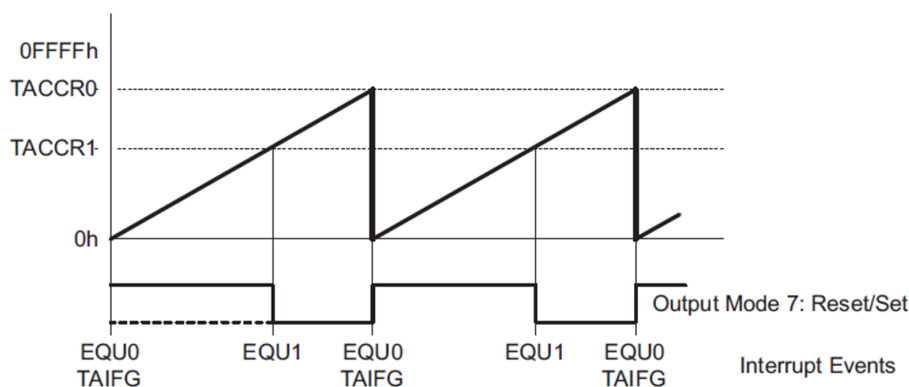
Na displeji jsou znázorňovány následující informace: Vertikální rychlost, výška, bargraf, tlak, teplota, piktogram reproduktoru, stav baterie. Tyto údaje jsou aktualizovány jednou za vteřinu. Výška a teplota jsou zobrazovány v celočíselném formátu. Vertikální rychlost je zobrazena velkým písmem s přesností na jedno desetinné místo. Bargraf je zobrazován v rozsahu od  $-5 m \cdot s^{-1}$  do  $5 m \cdot s^{-1}$ , jeden dílek odpovídá  $0,2 m \cdot s^{-1}$ . Bargraf napomáhá rychlejší čitelnosti údaje o stoupání/ klesání.

### 3.2.6 Zvuková indikace

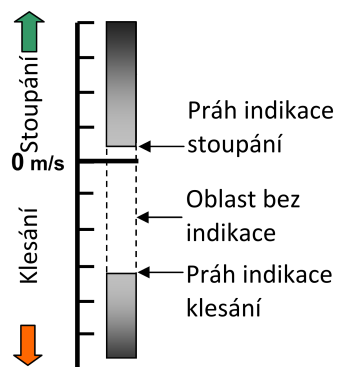
Piezoměnič je řízen pomocí pulzně šířkové modulace. Výstupní signál má střídu 1:1. Pin mikrokontroléru je přímo řízen časovačem TA1CTL. Zdroj hodinového signálu čítače je SMCLK. Časovač je používán v režimu reset/set. Čítá od nuly do hodnoty uložené v registru TA1CCR0. Výstup je nastaven na logickou jedna. Při dosažení hodnoty TA1CCR1 nastaví výstup do logické nula viz. obr. 3.9. Výstupní frekvence je nastavena pomocí zapsání hodnoty do registru TA1CCR0. Do registru TA1CCR1 je zapsána poloviční hodnota. Při frekvenci hodinového signálu 1Mhz a 16 bitovém čítači je možné takto nastavit výstupní periodu v rozsahu celého slyšitelného spektra. Kód nastavení frekvence byl převzat a upraven z [11].

Piezo měnič indikuje jak stoupání, tak klesání a to v nastavených mezích viz. obr. 3.9. V základu je nastavena indikace stoupání od  $0,3 m \cdot s^{-1}$  a klesání od  $-3 m \cdot s^{-1}$ . Tyto hodnoty je možné změnit podle preferencí pilota. Při klesání vydává variometr souvislý tón. Při stoupání jsou vydávány krátké tóny následované pauzou. Frekvence zvuku a délka pauzy jsou závislé na rychlosti stoupání. S větší rychlostí stoupá i frekvence, a to až do 5 kHz.

### 3. REALIZACE



Obrázek 3.9: Mód časovače TA1 [4]



Obrázek 3.10: Nastavení zvukové indikace

#### 3.2.7 Měření napětí baterie

Baterie je měřena pomocí 10 bitového analogově digitálního převodníku. Jako referenční napětí je zvoleno napájecí napětí mikrokontroléru. Hodnotě 3 V tedy odpovídá hodnota výstupního bufferu převodníku 1024. Napětí na baterii je dvojnásobkem přivedeného napětí na vstup, jeho velikost tedy můžeme spočítat podle následujícího vztahu.

$$U_{batt} = 2 \cdot \frac{3 \cdot ADC10MEM}{2^{10}} \quad (3.7)$$

Kapacita baterie je indikována piktogramem baterie v dolní části displeje. Piktogram je rozdělen na 4 části ty jsou aktivovány podle napětí baterie

100 % pro  $U_{batt} > 4 \text{ V}$

75 % pro  $4 \text{ V} > U_{batt} > 3,85 \text{ V}$

50 % pro  $3,85 \text{ V} > U_{batt} > 3,7 \text{ V}$

25 % pro  $3,7 \text{ V} > U_{batt} > 3,6 \text{ V}$

Pokud napětí baterie poklesne pod  $3,6 \text{ V}$  je vypsáno varovné hlášení.



---

## Ekonomický rozbor

V této kapitole je sestaven jednoduchý ekonomický rozbor pro eventuální výrobu. Výchozí předpoklady jsou následující:

- Zaměstnavatel je plátcem DPH
- Výroba a osazení DPS v externí firmě.
- Výrobek se bude prodávat 3 roky v množství 1000 kusů za rok.
- Vývoj trval 3 měsíce. Hrubá měsíční mzda vývojáře je 55075 Kč.
- Výrobní režie 20000 Kč (nájem a energie).
- Správní režie 10000 Kč (účetní, telefon, ostatní náklady).
- Odbytové náklady 15000 Kč (logistika a marketing).

Dle těchto předpokladů zaměstnavatel odvede na superhrubé mzdě za tři měsíce 224140 Kč. Za dobu tří let zaplatí na výrobní režii 720000 Kč, správní režii 360000 Kč a nákladech na odbyt 540000 Kč. Součástky a služby od externích firem vstupují do kalkulace bez DPH. Náklady na vývoj a režijní náklady za dobu prodeje jsou přepočítány na jeden výrobek.

Zaměstnavatel odvede dohromady na zaměstnavatele státu za tři měsíce 56176 Kč na zálohách na daň, sociálním a zdravotním pojištěním. Na dani z příjmu odvedeme státu 315 Kč v přepočtu na jeden výrobek.

Koncová cena výrobku by tedy byla pod hranicí 2000 Kč viz. tab. 4.1. Tato cena je mnohem nižší než u komerčně dostupných variometrů stejné kategorie.

Tabulka 4.1: Kalkulace jednotkové ceny výrobku

Položka	cena [Kč]
Součástky	252,1
Výroba DPS	208,3
Osazení DPS	82,6
Krabička	41,3
Vývoj	73,8
Nájem, Energie	240
Správní režie	120
Odbytové náklady	180
Celkem	1198,1
Zisk 25%	1497,6
Koncová cena s DPH	1812,1

---

## Dosažené výsledky

Byl navržen a realizován funkční variometr pro paragliding s následujícími parametry.

Výškoměr: Teplotní korekce, absolutní výška, rozlišení 1 m

Variometr: Hodnota s rozlišením  $0,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , nastavitelná zvuková signalizace stoupání a klesání, zobrazení bargrafu v rozsahu od  $-5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  do  $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Teplota: Rozlišení  $1 \text{ }^\circ\text{C}$

Tlak: Rozlišení 1 Pa

Displej: Černobílý s rozlišením 84 x 48 px

Baterie: 1020 mAh dobíjecí lithium iontová baterie, více než 100 hodin provozu

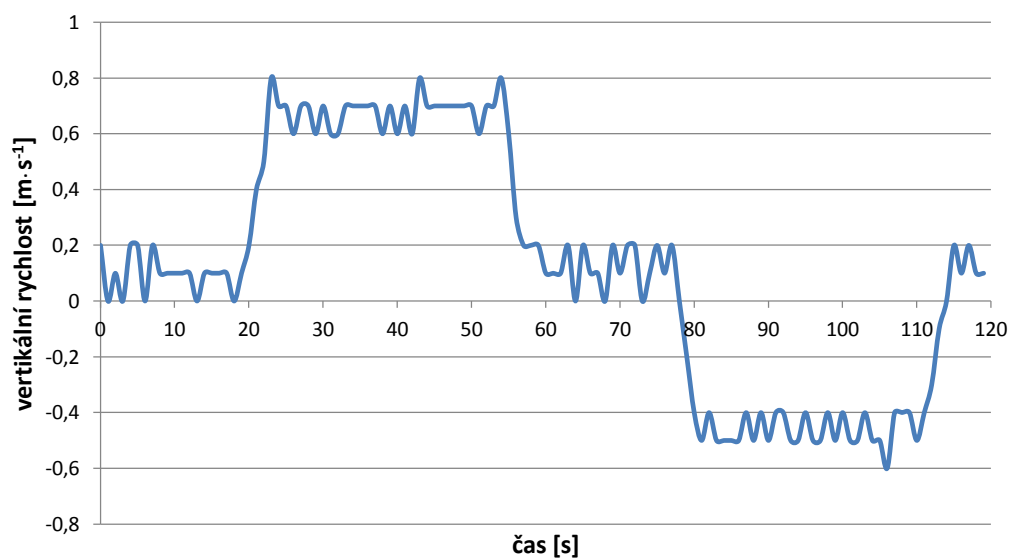
Rozměry: 85 mm x 59 mm x 43 mm

Funkce variometru byla ověřena sérií testů ve výtahu. Výtah projížděl 8 pater a překonával výšku 23 m. Byla zvolena cesta větší citlivosti zařízení, před zaváděním zpožděním do systému. Proto vertikální rychlost osciluje v mezích  $0,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  od skutečné hodnoty viz. obr.5.1. To je pro paragliding dostačující, vertikální rychlost v termických proudech je v řádech jednotek  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

Program variometru je možné přeprogramovat a ladit bez vyjmutí mikrokotroléru, a to pomocí rozhraní Spi-Bi-Wire. Rozhraní využívá pouze 2 signálové vodiče. Piny test a reset, které s k tomuto účely používají, jsou vyvedeny na desce plošného spoje. Stejně tak je vyvedena linka UART, po které jsme schopni vyčítat data z variometru a dále zpracovávat.

## 5. DOSAŽENÉ VÝSLEDKY

---



Obrázek 5.1: Test variometru ve výtahu



---

## Závěr

Byla provedena rešerše současného řešení elektronických variometrů pro paragliding. Na trhu se vyskytují jak jednoduché audio variometry, tak složitější s analogovým variometrem a GPS přímačem. Vertikální rychlost je u těchto variometrů získávána proložení série hodnot výšky funkcí.

Funkční vzorek variometru byl realizován s tlakovým senzorem MS5611, který má vysoké rozlišení a umožňuje vysokou vzorkovací frekvenci. Data senzoru jsou filtrována metodou jednoduchého klouzavého průměru. K proložení výšky je použita metoda nejmenších čtverců. Vertikální rychlost je zobrazena každou vteřinu.

Variometr počítá vertikální rychlost s přesností na jedno desetinné místo. Umožňuje dostatečně přesně rozeznat stoupání a klesání. Oproti variometrům ve své kategorii zobrazuje bargraf.

Dle ekonomického rozboru by při hromadné výrobě byla cena realizovaného variometru nižší, než u variometrů dostupných na trhu.

Výhledově by bylo možné zmenšit variometr použitím smd varianty mikrokontroléru a umožnit ukládání letových dat připojením externí paměti.



---

# Literatura

- [1] Doc. Ing. Karel Draxler, C.: *Přístrojové systémy letadel II*. Vydavatelství ČVUT, 2002.
- [2] Ascent: *Ascent V1 Vario Instructions*[online]. Dostupné z: [http://www.ascentvario.com/pdf/instructions\\_english\\_v1.pdf](http://www.ascentvario.com/pdf/instructions_english_v1.pdf)
- [3] Fajmon, R. B.: *Matematika 3*.
- [4] Texas instruments: *MSP430x2xx Family User's Guide* [online]. [cit. 2013-05-08]. Dostupné z: [www.ti.com/lit/ug/slau144j/slau144j.pdf](http://www.ti.com/lit/ug/slau144j/slau144j.pdf)
- [5] Texas instruments: *Datasheet MSP430G2x53, MSP430G2x13 Mixed Signal Microcontroller (Rev. J)*[online]. [cit. 2013-05-08]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/gpn/msp430g2553>
- [6] Measurement specialties: *MS5611-01BA03 Barometric Pressure Sensor, with stainless steel cap*[online]. [cit. 2013-05-08]. Dostupné z: <http://www.meas-spec.com/downloads/MS5611-01BA03.pdf>
- [7] Philips: *Data sheet PCD8544 48 x 84 pixels matrix LCD controller/driver*[online]. [cit. 2013-05-08]. Dostupné z: <https://www.sparkfun.com/datasheets/LCD/Monochrome/Nokia5110.pdf>
- [8] Battery university: *Lithium based batteries*[online]. Dostupné z: [http://batteryuniversity.com/learn/article/lithium\\_based\\_batteries](http://batteryuniversity.com/learn/article/lithium_based_batteries)
- [9] Texas instruments: *Ultra-Low IQ, 50mA LDO Linear Regulators w/Power Good Output in SC70 (Rev. I)*[online]. [cit. 2013-05-08]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/gpn/tps79730>
- [10] 43oh: *Nokia 5110 display library by RobG*[online]. Dostupné z: <http://forum.43oh.com/topic/1312-nokia-5110-display/>

## LITERATURA

---

- [11] Pataga: *A Coin Cell Vario*[online]. Dostupné z: <http://pataga.net/pic24f16vario.html>

## Seznam použitých zkratk a symbolů

**ACLK** Auxilliary Clock

**ADC** Analog to Digital Converter

**CLK** Clock

**CMOS** Complementary Metal Oxide Semiconductor

**CPU** Central Processing Unit

**CS** Chip Select

**DIL20** Dual in-line package

**DDRAM** Display Data Random Access Memory

**D/C** Data/Command

**DPH** Daň z přidané hodnoty

**DPS** Deska plošného spoje

**GND** Ground

**GPS** Global Positioning System

**IIC** Inter Integrated Circuit

**LCD** Liquid Crystal Display

**LDO** Low-dropout regulator

**Li-ion** Lithium-ion

## A. SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

---

**MISO** Master In Slave Out

**MCLK** Master Clock

**MOSI** Master Out Slave In

**NC** Not Connected

**PROM** Programmable Read Only Memory

**PS** Protocol Select

**QFN** Quad Flat No-leads package

**RAM** Random Acces Memory

**RES** Reset

**RISC** Reduced Instruction Set Computing

**ROM** Read Only Memory

**SMCLK** Sub System Master Clock

**SPI** Serial Peripheral Interface

**UART** Universal Asynchronous Receiver and Transmitter

**UCC** Positive supply voltage

**USCI** Universal Serial Communication Interface

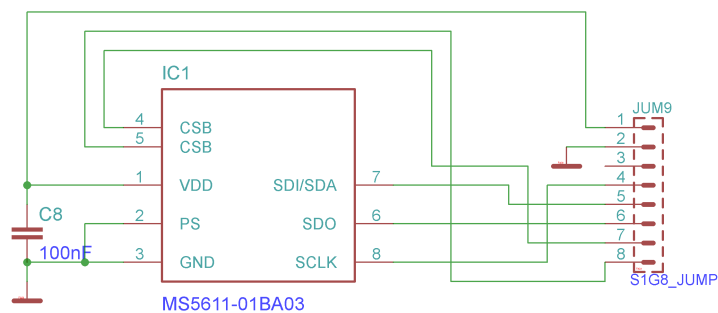
---

$A$  jednotka elektrického proudu  
 $Ah$  jednotka elektrického náboje  
 $bar$  jednotka tlaku  
 $^{\circ}C$  jednotka teploty  
 $F$  jednotka elektrické kapacity  
 $g$  gravitační konstanta  
 $Hz$  jednotka frekvence  
 $m \cdot s^{-1}$  jednotka rychlosti  
 $K$  jednotka termodynamické teploty  
 $Pa$  jednotka tlaku  
 $px$  obrazový prvek  
 $V$  jednotka elektrického napětí  
 $\Omega$  jednotka elektrického odporu  
 $dT/dH$  teplotní koeficient  
 $H$  absolutní výška od mořské hladiny  
 $P$  tlak ve výšce  $H$   
 $P_0$  tlak v nulové výšce  
 $R$  plynová konstanta pro vzduch  
 $T_0$  teplota v nulové výšce



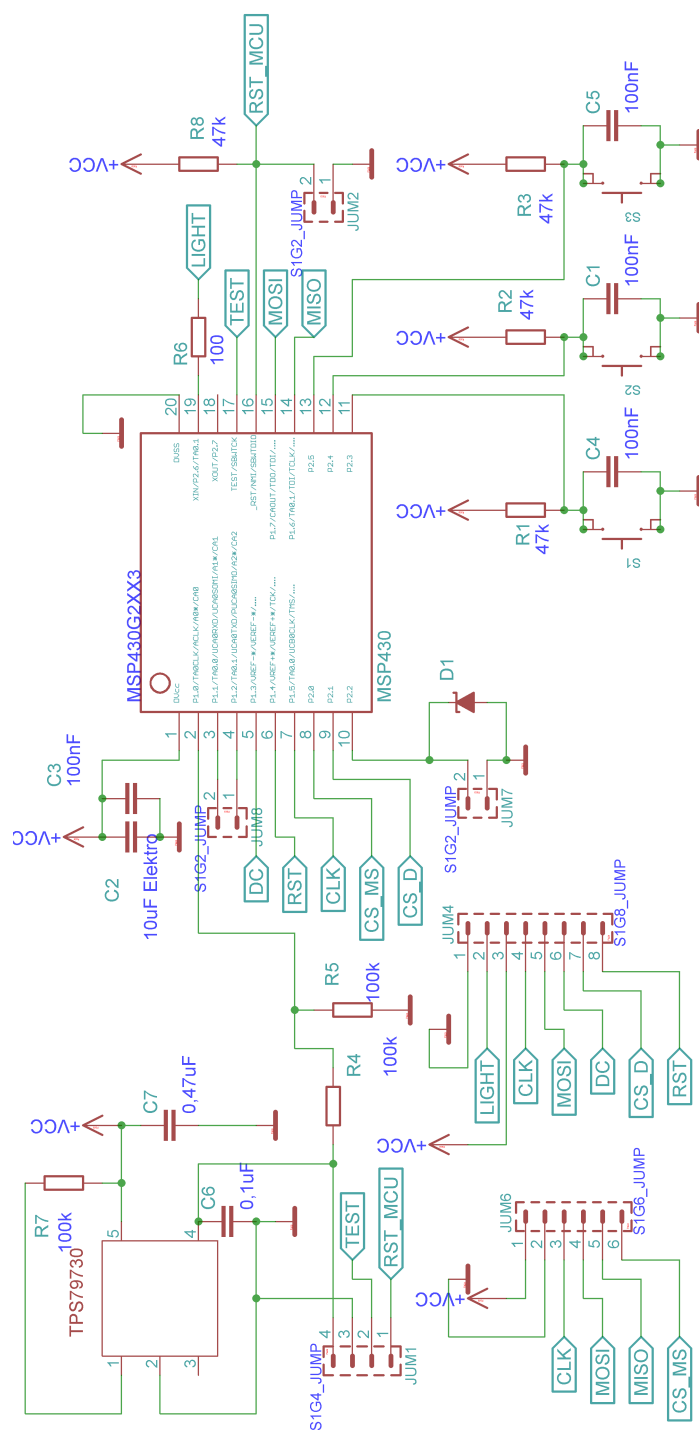


## Schéma zapojení variometru



Obrázek B.1: Schéma zapojení senzoru

## B. SCHÉMA ZAPOJENÍ VARIOMETRU



Obrázek B.2: Schéma zapojení

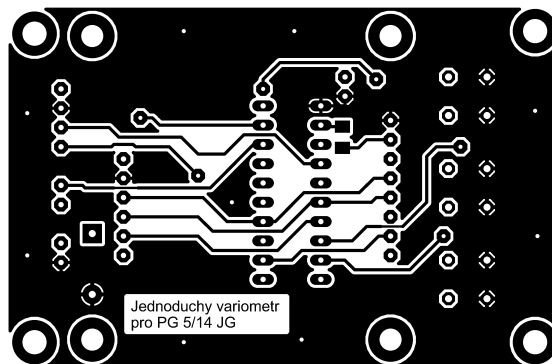
## **Seznam součástí**

## C. SEZNAM SOUČÁSTEK

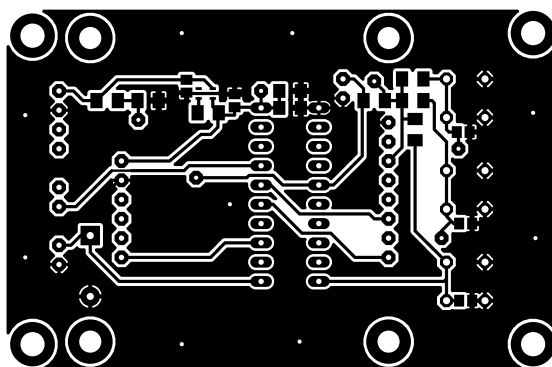
---

Označení	Hodnota	Pouzdro
C1, C4, C5, C6	100nF	SMD0805
C2	10uF Elektro	SMD1206
C3	100nF	SMD1206
C7	0,47uF	SMD0805
D1	BZX55C3V0	CDIL
IC1	MS5611-01BA03	QFN
JUM1	XINYA S1G4	
JUM2, JUM7, JUM8	XINYA S1G2	
JUM3	BL804G	
JUM4	XINYA S1G8	
JUM5	BL804G	
JUM6	XINYA S1G6	
MSP430	MSP430G2553	DIL20
R1,R2,R3, R8	47k	M1206
R4, R5, R7	100k	M1206
R6 100R	M1206	
S1, S2, S3	P-DT6BL	
TPS	TPS79730	SC70

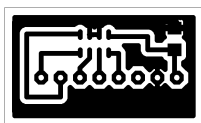
## Deska plošného spoje



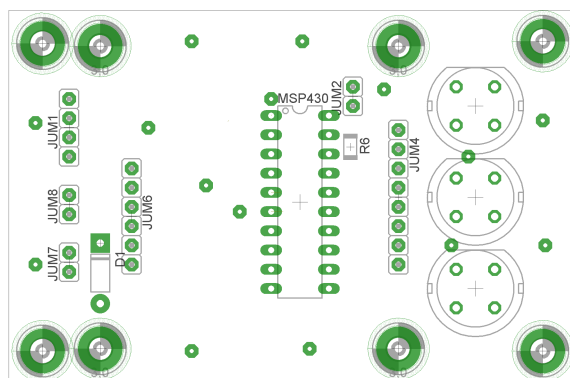
Obrázek D.1: Tištěný spoj vrchní strana



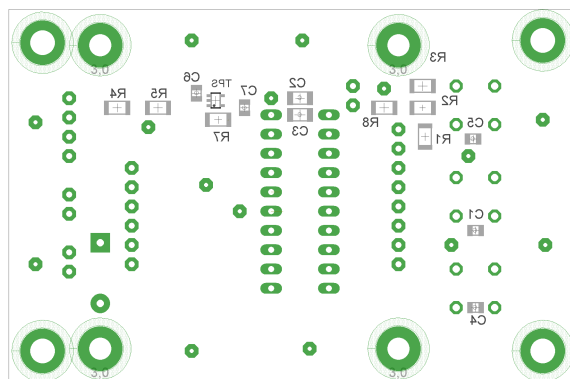
Obrázek D.2: Tištěný spoj spodní strana



Obrázek D.3: Tištěný spoj deska senzoru



Obrázek D.4: Osazovací plán vrchní strana



Obrázek D.5: Osazovací plán spodní strana



Obrázek D.6: Osazovací plán deska senzoru

---

## Obsah přiloženého CD

readme.txt.....	stručný popis obsahu CD
variometr.....	zdrojový kód variometru
├── .ccsproject.....	projekt CCS
├── .cproject.....	projekt C
├── .project.....	projekt
├── audio.h.....	funkce pro obsluhu piezoměniče
├── display.h.....	funkce pro obsluhu displeje
├── lnkmsp430g2553.cmd.....	linker
├── main.c.....	hlavní program
├── MS5611.h.....	funkce pro obsluhu senzoru
├── PCD8544.h.....	ovladač displeje
├── popis.txt.....	popis programu
├── uart.h.....	funkce pro obsluhu uart
└── text.....	text práce
└── thesis.pdf.....	text práce ve formátu PDF