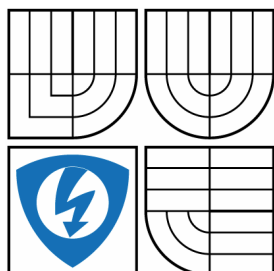


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

ZÁZNAMOVÁ JEDNOTKA DO UL LETADLA

DATALOGGER FOR UL AIRCRAFT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. MICHAL MAREK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. STANISLAV KLUSÁČEK, Ph.D.

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Kybernetika, automatizace a měření

Student: Bc. Michal Marek

ID: 14554

Ročník: 2

Akademický rok: 2012/2013

NÁZEV TÉMATU:

Záznamová jednotka do UL letadla

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Vypracujte návrh záznamového zařízení letových údajů do UL letadel. Předpokládá se záznam těchto údajů: výšky letadla, rychlosti letu, násobků přetížení, GPS polohy, otáček motoru, venkovní teploty a časového údaje. Záznamovým zařízením bude FLASH SD karta. V návrhu uvažte volbu vhodného procesoru, koncepci komunikačního rozhraní a formát ukládaných dat. V diplomové práci se předpokládá realizace funkčního vzorku - návrh DPS, programové vybavení a ověření správnosti funkce.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Herout, P. Učebnice jazyka C, KOPP, 2004, IV. přepracované vydání, ISBN 80-7232-220-6
Dle doporučení a pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 11.2.2013

Termín odevzdání: 20.5.2013

Vedoucí práce: Ing. Stanislav Klusáček, Ph.D.

Konzultanti diplomové práce:

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá návrhem zapisovače letových dat pro UL letadla. V teoretické části jsou popsány základní principy měření jednotlivých veličin ve vztahu k provozu letadla, např. výšky, rychlosti. V samostatné kapitole se věnuji systémům pro určení polohy GPS. Dále jsou zde uvedeny příklady přístrojů měřících tyto veličiny. Praktická část je zaměřena na popis vybraných komponent a jejich obsluhu mikrokontrolérem PIC24FJ64GA004. Následuje popis obsluhy USB disků pomocí USB kontroléru Vinculum-II. Práce je zakončena provedením testu funkčnosti zařízení.

Klíčová slova

UL letadla, zapisovač letových dat, GPS, mikrokontrolér PIC 24FJ64GA004, Vinculum-II

Abstract

This thesis describes the design of flight data recorder for UL aircraft. The theoretical part describes the basic principles of measurement of the quantities in relation to the operation of the aircraft, such as altitude, air speed. A separate chapter deals with systems for determining of GPS position. Furthermore, there are examples of instruments measuring these quantities. The practical part is focused on the description of selected components and their connection to PIC24FJ64GA004 microcontroller. This is followed by a description of the control of USB drives with USB Controller Vinculum-II. The work is finished by the functional test of the device.

Keywords

UL aircraft, flight data recorder, GPS, microcontroller PIC 24FJ64GA004, Vinculum-II

Bibliografická citace:

MAREK, M. *Záznamová jednotka do UL letadla*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 54s. Vedoucí diplomové práce byl Ing. Stanislav Klusáček, Ph.D.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma *Záznamová jednotka do UL letadla* jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

V Brně dne: **20. května 2013**

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Stanislavu Klusáčkovi, Ph.D. za pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne: **20. května 2013**

.....
podpis autora

Obsah

1	Úvod.....	8
2	Teoretická část.....	9
2.1	Systémy určování polohy	9
2.1.1	Systém NAVSTAR GPS	9
2.1.2	NMEA protokol.....	10
2.2	Rychlost letadla	11
2.2.1	Měření rychlosti vůči zemi.....	11
2.2.2	Měření rychlosti vůči okolnímu vzduchu.....	11
2.3	Výška	14
2.3.1	Měření klasickými přístroji	14
2.4	Násobky zatížení.....	15
2.5	Otáčky motoru	16
3	Realizace	19
3.1	Zapísovače letových údajů na trhu	19
3.2	Požadavky na zapisovač letových dat.....	19
3.3	Základní schéma zapisovače letových dat	19
3.4	Mikrokontrolér PIC24FJ64GA004.....	20
3.4.1	Vývojové prostředky firmy MikroElektronika.....	22
3.4.2	Firmware a modul reálného času.....	22
3.5	GPS modul a jeho obsluha.....	25
3.6	Datová úložiště	27
3.7	Vinculum-II	30
3.7.1	Vývojové prostředky Vinculum-II	32
3.7.2	Tvorba firmware pro Vinculum-II	34
3.8	Vzdušná rychlost	36
3.9	Tlaková výška.....	37
3.10	Otáčky motoru	39
3.11	Teplota hlav motoru.....	40
3.12	Okolní teplota	41
3.13	Akcelerometr	43
3.14	Napájení.....	44
3.15	Strojní zpracování.....	45
3.16	Finální výrobek.....	47
3.17	Testování a měření.....	49
4	Závěr.....	50
5	Seznam obrázků	51
6	Použité zkratky	52
7	Použitá literatura.....	53

1 ÚVOD

V dnešní době není velký problém stát se pilotem UL letadla nebo jej vlastnit. Výroba těchto sportovních létajících zařízení, jak zní jejich oficiální název, stoupá a posunuje se dopředu i z hlediska použitých materiálů a technologií. Tím stoupá i jejich cena a vznikají různé třenice při prokazování závad při reklamacích a opravách. Výrobci nyní nemají k dispozici nějaký efektivní a ekonomicky dostupný systém pro monitoring letadla během jeho provozu. Díky tomu vznikl požadavek na výrobu zapisovače letových dat. Požadavky na zapisovač letových dat (dále jen ZLD) vycházejí z jeho zamýšleného použití pro UL letadla jako kontrola, kde letadlo bylo a v jakých režimech letu se nacházelo. Primární využití by mělo zařízení najít u výrobců UL letadel, kteří by tímto měli mít možnost zkontrolovat režimy letadla během jeho provozu, nepřekročení povolených mezí a případnou analýzu vzniklých problémů během provozu. Samozřejmě i uživatel má v tomto ohledu prostředky pro obranu vůči výrobcu. Použití se však předpokládá i v leteckých školách pro kontrolu výcviku, leteckých klubech pro kontrolu nalétaných hodin nebo čistě kontrolu soukromých letadel při jejich zapůjčení apod.

Cílem této práce je návrh a sestavení zapisovače letových dat. V této práci si nastíníme principy měření jednotlivých veličin během letu klasickými přístroji, z nichž poté budeme vycházet ve výběru vhodných čidel a senzorů pro konstruované zařízení. Dále je nutné zvolit formát ukládaných dat, výběr média, na které budou data ukládána. Finálním zakončením práce by měl být funkční výrobek, který bude otestován.

2 TEORETICKÁ ČÁST

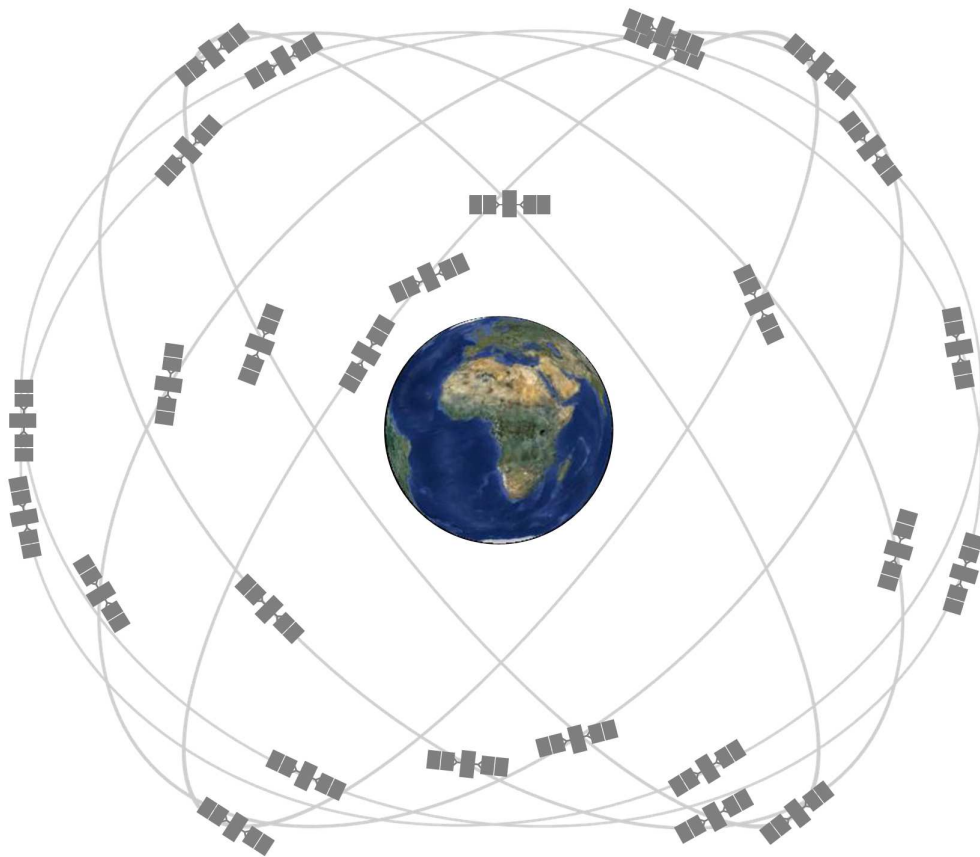
2.1 Systémy určování polohy

Systémy pro navigaci se staly nedílnou součástí dnešního života. Od prvních GPS přijímačů prošly přístroje velkým technickým pokrokem a dnes můžeme GPS přijímač nalézt mimo přístrojů pro navigaci ve většině chytrých telefonů, jsou integrovány v některých fotoaparátech a mnoha dalších zařízeních. Běžně se dnes používají pro navigaci na vodě, zemi i ve vzduchu. V dnešní době existují čtyři systémy pro určení polohy na Zemi a v jejím blízkém okolí. Jedná se o americký NAVSTAR GPS, ruský GLONASS a evropský projekt GALILEO a čínský systém BeiDou [1-4].

2.1.1 Systém NAVSTAR GPS

Americký systém NAVSTAR GPS, známý obecně jako GPS – Global Positioning System, byl zpočátku určen pouze pro armádní využití, později byl uvolněn i pro komerční využití [4]. Do května roku 2000 byla systému GPS pro komerční využití uměle zhoršována přesnost vládou USA. Po tomto datu je již přesnost systému pro armádní i civilní využití stejná. Nicméně vojenská zařízení používají dvě frekvence, což umožňuje korigovat degradaci signálu při průchodu zemskou atmosférou, a tím získat vyšší přesnost určení polohy. Systém GPS tvoří vesmírný segment, řídicí a kontrolní segment a uživatelský segment. Celý systém je pod správou U.S. Air Force.

Do vesmírného segmentu patří družice na oběžné dráze, které vysílají rádiový signál k uživateli. Tyto družice obíhají zemi na střední oběžné dráze, 20 200 km nad povrchem a oběhnou Zemi dvakrát za den. V průběhu vývoje celého systému bylo vyvinuto i několik typů družic. Nejnovější družice má označení GPS Block IIF. Správce systému zaručuje provozuschopnost 24 satelitů v 95% času. Celkem je v provozu 31 satelitů a 3-4 náhradní, které mohou být aktivovány v případě potřeby.



Obrázek 2.1 Schéma uspořádání satelitů GPS[4].

Kontrolní a řídicí segment zajišťuje monitorování stavu satelitů, sledování vysílaných dat, řízení satelitů. Sestává se z hlavního řídicího centra, záložního řídicího centra, 12 antén a 16 kontrolních míst.

Uživatelský segment pokrývá velkou oblast využití, např. pozemní, námořní a letecká doprava, turistika, zemědělství, geodézie, přesné časování.[4]

GPS přijímač poskytuje zeměpisné souřadnice v systému WGS84, což je celosvětově uznávaná norma pro udávání zeměpisných souřadnic. Pokud chceme zobrazovat souřadnice v jiném souřadnicovém systému, je nutno je přetransformovat.[8]

2.1.2 NMEA protokol

NMEA – National Marine Electronics Association – je organizace, která vydává normy pro komunikaci mezi zařízeními určenými původně pro lodní dopravu. Standard NMEA 0183 definuje elektrické požadavky, protokol a čas přenosu, specifikuje věty pro sériovou linku na rychlosti 4800 baudů. Standard určuje, že může být pouze jeden vysílající člen, ale může být více přijímacích členů. Datový formát je ASCII. Tento protokol je použit pro přenos dat z GPS přijímače.

2.2 Rychlost letadla

Měření rychlosti letadla můžeme rozdělit do dvou skupin, podle toho zda měříme rychlost vůči okolnímu vzduchu, nebo rychlost vůči zemi. Rychlost letadla vůči okolnímu vzduchu je pro pilota jeden z nejdůležitějších údajů, protože při poklesu rychlosti pod tzv. rychlost pádovou dochází ke ztrátě vztlaku na křídlech, a tím k pádu letounu. Naopak při rychlosti přesahující rychlost nepřekročitelnou může dojít k destrukci letounu vlivem velmi silných aerodynamických sil. Rychlost letounu vůči zemi, je důležitá z hlediska času letu z jednoho místa do jiného. Tyto dvě rychlosti si budou velmi podobné v menších výškách při nehybném vzduchu. Je ale celkem běžné, že se tyto rychlosti nerovnají, např. pokud poletí letoun rychlostí 100 km/h vůči okolnímu vzduchu a bude foukat vítr o rychlosti 20 km/h proti směru letu, rychlost letounu vůči zemi bude již jen 80 km/h. V letectví se používá několik jednotek pro rychlost, jsou to m/s (metr za sekundu), km/h (kilometr za hodinu) a kt(uzel). Pro přepočítání používáme následující návod[5]:

$$\begin{array}{lclcl} 1 \text{ m/s} & = & 3,6 \text{ km/h} & = & 1,95 \text{ knots} \\ 1 \text{ km/h} & = & 0,28 \text{ m/s} & = & 0,54 \text{ knots} \\ 1 \text{ knot} & = & 0,52 \text{ m/s} & = & 1,85 \text{ km/h} \end{array}$$

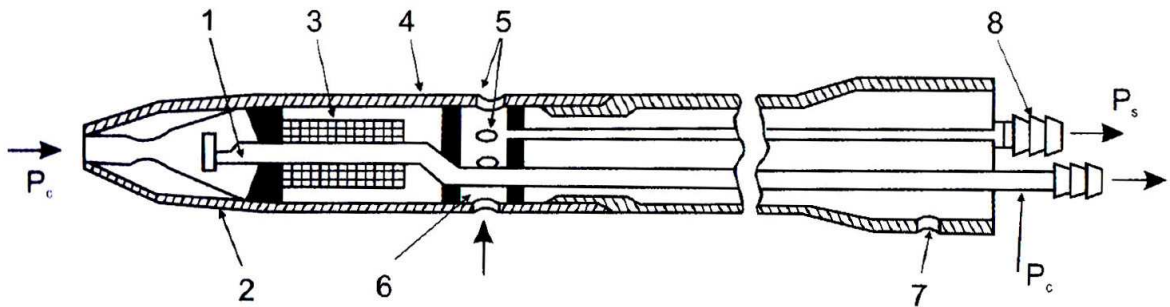
2.2.1 Měření rychlosti vůči zemi

Určení rychlosti letounu vůči zemi se provádí výpočtem jako podíl uletěné vzdálenosti a času k tomu potřebnému. Jde pouze o to, jak přesné je určení polohy a spočtení času. Je tedy snadné spočítat tuto rychlost pokud např. vidíme z letounu zemi pod námi a můžeme odečíst čas při průletu nad dvěma body o kterých víme jak jsou daleko. Tato metoda má několik nevýhod, např. musíme počítat výpočty, což odvádí pozornost od řízení stroje pokud letíme sami, musíme mít mapu s dostatečným měřítkem pro odečtení vzdálenosti apod., navíc tento údaj nemáme okamžitě. V dnešní době se proto využívá GPS modulů, které toto počítají z každé aktuální změny souřadnic. Tato rychlost se zobrazuje například i v automobilových navigacích, tedy pokud jedeme po rovném úseku, můžeme zjistit skutečnou rychlost vozidla po komunikaci.

2.2.2 Měření rychlosti vůči okolnímu vzduchu

Měření rychlosti vzhledem k okolnímu vzduchu se provádí pomocí měření rozdílu mezi dynamickým a statickým tlakem. Na letadle se měří dva tlaky a to tlak celkový a statický tlak. Tlak celkový je složen z tlaku dynamického a tlaku statického.

Existuje několik typů měřících aparatur na měření celkového a statického tlaku, na některých typech letadel je snímání provedeno oddělenými odběrnými místy, např. kluzák L-13 Blaník má snímač celkového tlaku v přední části letounu a snímače statického tlaku na stranách trupu v úrovni zadní sedačky kokpitu. Dále existují sružené přístroje, jako např. Prandtlova trubice, která se umísťuje nejčastěji pod křídlo tak, aby byla co nejméně ovlivňována např. vrtulovým vírem apod. Dále je nutné mít možnost trubici vyhřívat, aby se zamezilo zamrznutí trubice a tím pádem ztráty informací o rychlosti, která je životně důležitá.



Obr. 3. Schema Prandtlovy trubice

1 – sonda P_c , 2 – komora P_c , 3 – vyhřívací tělísko, 4 – těleso snímače, 5 – snímání P_s , 6 – komora P_s , 7 – odkalení, 8 – výstup stat.tlaku, P_s – tlak statický, P_c – tlak celkový

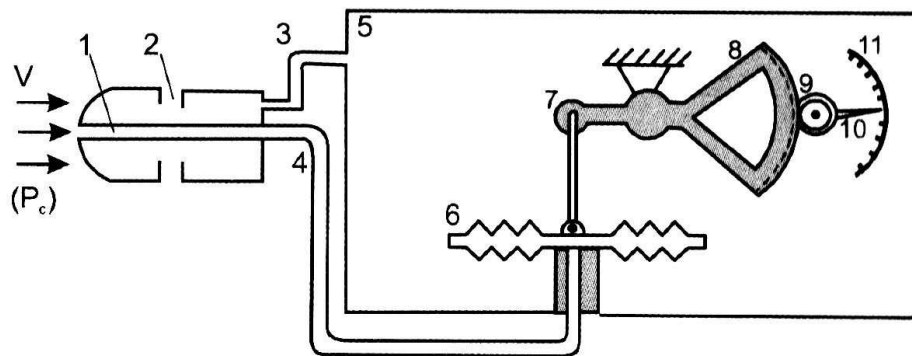
Obrázek 2.2 Schéma Prandtlovy trubice. Převzato z [5].

Klasický ručkový rychloměr je v podstatě diferenční tlakoměr, který má ovšem stupnici v jednotkách rychlosti.

$$P_{celk} = P_{stat} + P_{dyn} \quad (1)$$

$$P_{dyn} = \frac{\rho \cdot v^2}{2} \quad (2)$$

kde ρ je hustota vzduchu a v je rychlost letu. Rychloměr ukazuje indikovanou vzdušnou rychlost (IAS), která je totožná s pravou vzdušnou rychlostí (TAS) pouze v 0 m za podmínek MSA (mezinárodní standardní atmosféra). V ostatních případech je IAS vždy nižší než TAS. [5]



Obr. 6. Schéma rychloměru

- 1 – snímač celkového tlaku, 2 – snímač statického tlaku, 3 – vedení stat.talku,
 4 – vedení celkového tlaku, 5 – těleso přístroje, 6 – barokrabice (Vidiho),
 7 – převodový mechanismus, 8,9 – ozubený převod, 10 – ukazatel, 11 – stupnice



Obr. 7. Pohled na rychloměr

Obrázek 2.3 Schéma a zobrazení klasického leteckého rychloměru. Převzato z [5].

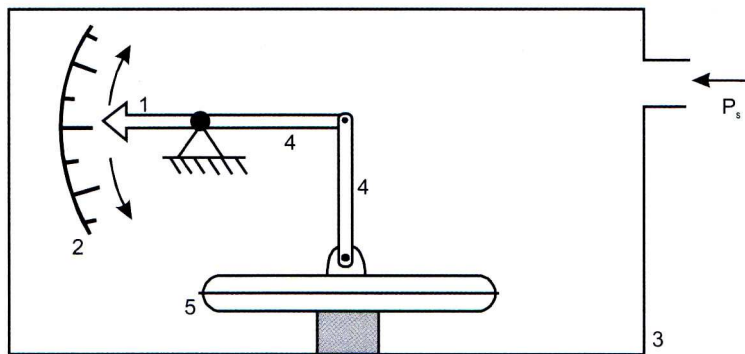
2.3 Výška

V souvislosti s výškou letadla se v letectví uvádí několik pojmů. Rozlišujeme výšku nad terénem (AGL), nadmořskou výšku (AMSL) a letovou hladinu (FL). Měření AGL je obtížné barometricky přesně určit, určuje se pomocí radiovýškoměru nebo pomocí laserového měření. V letectví se pro měření výšky používají jednotky m (metr) nebo ft (stopa). Nad určitou výškou, zvanou převodní výška, se nepoužívá pro vyjádření výšky těchto jednotek, ale výšku udáváme pomocí letové hladiny(FL). Ta se udává ve stovkách stop. Převod mezi jednotkami je následující [5,9]:

$$\begin{aligned} 1 \text{ ft} &= 0,3048 \text{ m} \\ \text{FL}100 &= 10\,000 \text{ ft} \end{aligned}$$

2.3.1 Měření klasickými přístroji

Nadmořskou výšku i letovou hladinu měříme barometricky, tedy sledujeme změnu tlaku v závislosti na výšce. Principem klasického výškoměru je snímání změny statického tlaku a přenos této změny pomocí převodového mechanismu na stupnici. Dle této stupnice můžeme rozdělit výškoměry na metrické a stopové výškoměry. Metrické výškoměry mají většinou dvě ručičky, menší na tisíce metrů, velká pak stovky a desítky metrů. Stopové výškoměry mají většinou indikaci pro desítky tisíc, tisíce a stovky stop. Stopové výškoměry jsou citlivější. Výškoměry mají mechanismus pro nastavení tlaku. Pokud na výškoměru nastavíme tlak QNH, což je tlak přepočtený na hladinu moře, bude nám výškoměr ukazovat nadmořskou výšku. Pokud na výškoměru nastavíme tlak 1013,25 hPa (dle MSA) tak nám výškoměr ukazuje letovou hladinu.[5]



Obr. 8. Schéma výškoměru

1 – ukazatel, 2 – stupnice, 3 – těleso přístroje, 4 – převodový mechanismus, 5 – barokrabice (Vidiho), P_s – tlak statický



Obr. 9. Pohled na výškoměr metrický



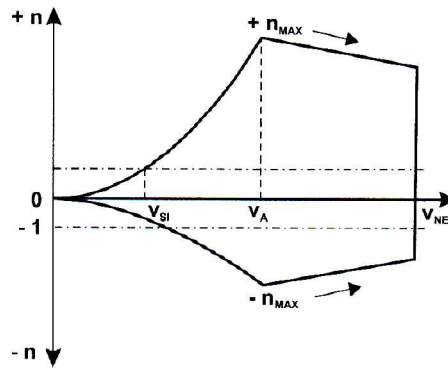
Obr. 10. Pohled na výškoměr stopový

Obrázek 2.4 Schéma a zobrazení klasického leteckého výškoměru. Převzato z [5].

Kromě měření výšky barometricky je možné výšku letu měřit i pomocí GPS, nicméně tento způsob není přesný.

2.4 Násobky zatížení

Letadlo je za letu namáháno mnoha silami. Pro určení velikosti zatížení používáme termín násobek zatížení letadla n . Kolmou složku násobku lze měřit akcelerometrem (g metrem). Pro běžný let je $n=1$, stav beztlíže je pak pro $n=0$. Tyto násobky jsou důležité z hlediska pevnosti konstrukce. Při různých režimech letu je možno dosáhnout pouze dané maximální velikosti násobku. Pokud si dosadíme do tzv. v-n diagramu maximální povolené násobky pro různé rychlosti, získáme obálku obrátů. Pokud se s letounem dostaneme mimo tuto obálku, může dojít k destrukci letounu. [5]



Obr. 69. Obálka obrátů

Vysvětlivky:

v_{SI} minimální rychlost vodorovného letu (let s násobkem $n = 1$, na max. úhlu náběhu)

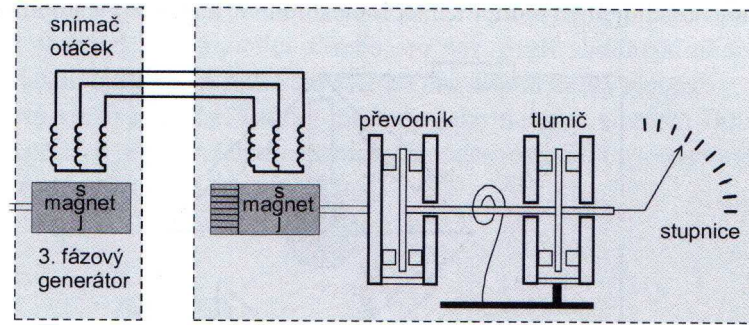
v_A návrhová rychlost (nejnižší rychlost, při níž je možno dosáhnout max. vychýlením výškového kormidla max. povoleného násobku)

v_{NE} maximální přípustná rychlost letu, někdy se nazývá nepřekročitelná (její hodnota je značena na rychloměru)

Obrázek 2.5 Obálka obrátů. Převzato z [5].

2.5 Otáčky motoru

Otáčky motorů letadel se měří pomocí otáčkoměrů. Otáčky v letectví udáváme v počtu otáček za minutu, označujeme ot/min, někdy také RPM, což je totéž, jen to vychází z anglického rotate per minute. Přístroje mohou být analogové nebo digitální. Analogové ještě můžeme rozdělit na mechanické a elektrické.[5]



Obr. 20. Schéma tachogenerátorového snímače a otáčkoměru

Obr. 21. Pohled na otáčkoměr

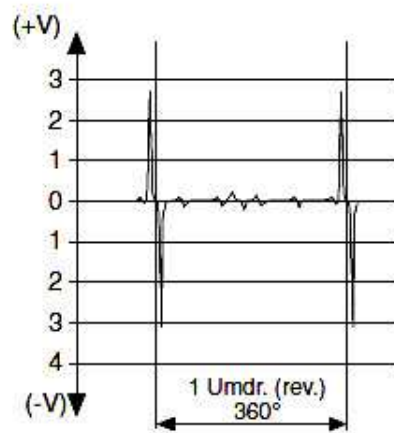


Obrázek 2.6 Princip a zobrazení otáčkoměru. Převzato z [5].

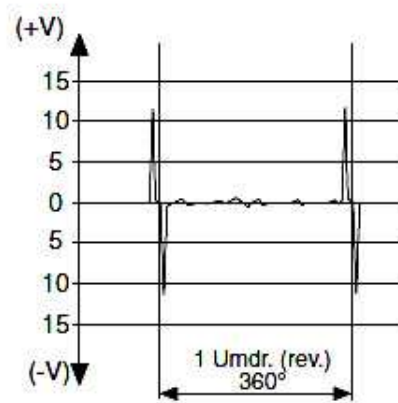
V motorech značky ROTAX používaných do UL letadel se otáčky motoru měří pomocí elektrických impulsů generovaných na cívce. Tento způsob pak usnadňuje zpracování signálu.[10]

Oscillogram

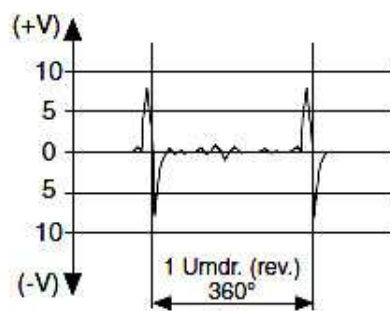
speed 500 rpm (load 100 Ω)



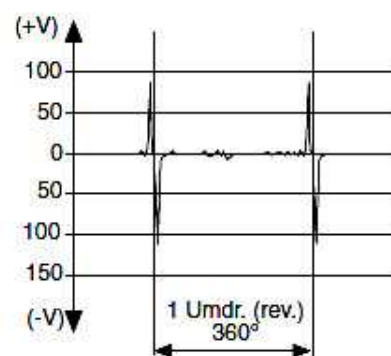
speed 500 rpm (load 100 k Ω)



speed 6000 rpm (load 100 Ω)



speed 6000 rpm (load 100 k Ω)



Obrázek 2.7 Velikost a tvar impulsního výstupu motoru ROTAX 912. Převzato z [10].

3 REALIZACE

3.1 Zapisovače letových údajů na trhu

Zapisovač letových údajů, který by zapisoval data v takovém rozsahu, jaký bude použit v tomto projektu na trhu neexistuje. Je zde mnoho GPS loggerů a zapisovačů polohy, ale žádný, který by pracoval i s tlakovým systémem letadla.

Další skupinou zapisovačů na trhu jsou sdružené obrazovky jako např. EFIS od TL elektronik nebo SkyView System od firmy Dynon Avionics. Tyto obrazovky sdružují letové přístroje jako rychloměr, výškoměr, variometr, akcelerometr apod. Dále jsou tyto obrazovky napojeny na anténu GPS a mohou tedy posloužit i jako navigace. Využívají se také na řízení letounu pomocí autopilota. Tyto obrazovky jsou sice výkonným nástrojem pro pilota, které mohou zaznamenávat všechny údaje, nicméně jejich cena je značně vysoká.[11,12]

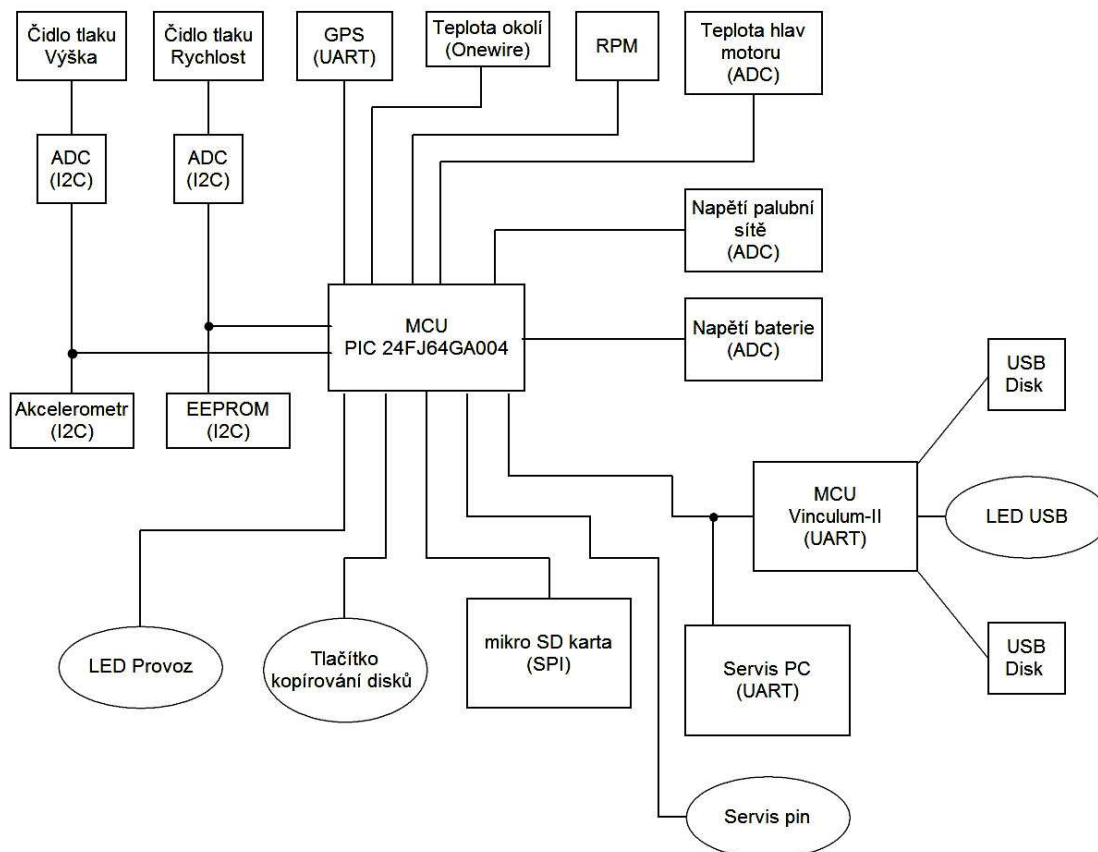
3.2 Požadavky na zapisovač letových dat

Vyrobít zařízení, které by odpovídalo „černé skříňce“ známé z civilního letectví ve smyslu odolnosti a použití by bylo značně náročné. Jelikož jak sám název *ultralehká letadla* naznačuje, váha UL letounu není vysoká a nesmí přesáhnout určitý limit. Tento limit je v ČR 450 kg, resp. 600 kg [13], což skýtá relativně málo prostoru pro hmotnost vybavení. Základním požadavkem je tedy vyrobit ZLD s co nejmenšími rozměry a váhou, za dodržení alespoň základní odolnosti proti vnějším vlivům a mechanickému poškození.

Zařízení má ukládat data z GPS modulu, dále rychlost a výšku letu, teplotu, násobky, otáčky motoru a napětí palubní sítě. Pro snímání výšky a rychlosti je nutné napojení na pitot-statický systém letounu a tudíž je nezbytné zajistit těsnost tohoto systému. Také bude zařízení napojené na palubní síť letadla a nemělo by tedy rušit ostatní zařízení.

3.3 Základní schéma zapisovače letových dat

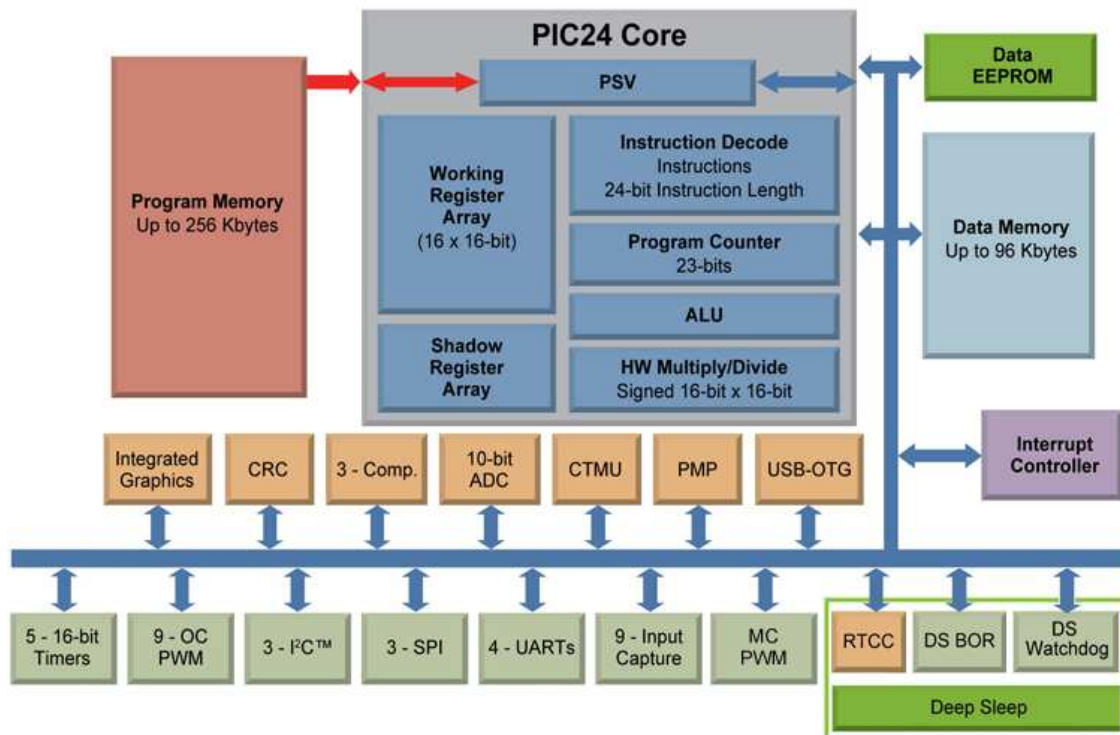
Na obrázku 3.1 je zobrazeno základní blokové schéma zapisovače letových údajů. Při tvorbě firmware jsem postupoval po jednotlivých částech programu.



Obrázek 3.1 Blokové schéma zapisovače letových údajů.

3.4 Mikrokontrolér PIC24FJ64GA004

Základní prvkem zařízení je mikrokontrolér, který bude vykonávat veškeré výpočty a obsluhovat všechny periferie. Požadavkům na výkon i množství a typ jednotlivých komunikačních rozhraní vyhovuje typ PIC24FJ64GA004 od firmy Microchip. Tento mikrokontrolér má 16 bitovou architekturu, 64 kB flash paměti a 8 kB SRAM paměti. Dodává se v několika typech pouzder, zvolil jsem pouzdro TQFP 44-pin, pro možnost osazení tohoto SMD pouzdra bez nutnosti využití speciální techniky pro osazování SMD součástek. Dále obsahuje tento chip integrovaný watchdog obvod, hardware Real-Time Clock/Calendar a komunikační periferie UART, I2C a SPI. Z analogových funkcí je využíván ADC převodník, který má rozlišení 10 bitů na až 13 kanálech.[14]



Obrázek 3.2 Základní blokové schéma architektury použitého mikrokontroléru. Převzato z [15].

Mikrokontrolér (MCU) je taktován externím krystalem o frekvenci 32 MHz pro jádro a krystal o frekvenci 32 768 Hz je použit pro obvod reálného času. Při taktování na 32 MHz je mikrokontrolér schopen zpracovat až 16 milionů instrukcí za sekundu. Taktování na maximální možnou frekvenci procesoru zabezpečuje dostatečný výkon pro zpracování všech požadavků a vykonání všech požadovaných funkcí v MCU. Firmware je možné nahrávat přes ICSP (In-Circuit Serial Programming) rozhraní a připojení k vývojovému prostředí je možné pomocí ICD (In-Circuit Debug).[14]

Při tvorbě zařízení jsem vycházel z doporučených zapojení uvedených v produktových listech a aplikačních poznámkách, dostupných online ze stránek výrobce integrovaného obvodu, firmy Microchip.[15]

Pomocí rozhraní UART MCU komunikuje s modulem GPS, s čipem Vinculum-II a pomocí tohoto rozhraní je realizována i servisní komunikace. Rozhraní SPI je použito pro obsluhu paměťové flash karty. I2C komunikace je použita pro komunikaci s pamětí EEPROM, čidlem zrychlení a AD převodníky u tlakových čidel. Jsou využívány oba vestavěné I2C moduly kvůli kolizi adres AD převodníků. Na každé lince I2C jsou tedy k MCU připojena dvě zařízení.

3.4.1 Vývojové prostředky firmy MikroElektronika

Pro efektivní psaní firmware pro mikrokontroléry je nezbytné dobré vývojové prostředí a programovací a ladící vybavení. V tomto projektu jsem využíval prostředí firmy MikroElektronika *mikroC PRO for dsPIC*. V tomto prostředí je možné psát program pro mikrokontrolér v jazyce C. Obsahuje také podpůrné prostředky pro vývoj aplikací a ladící prostředí. Pro programování a ladění firmware jsem používal programátor mikroProg (Obrázek 3.3), který je univerzální pro celou řadu mikrokontrolérů PIC. Do obvodu se připojuje pomocí pinové lišty, a další jeho výhodou je, že pokud potřebujeme využít programovací piny k dalšímu účelu v naší aplikaci, díky jeho dvojité pinové liště je to možné.

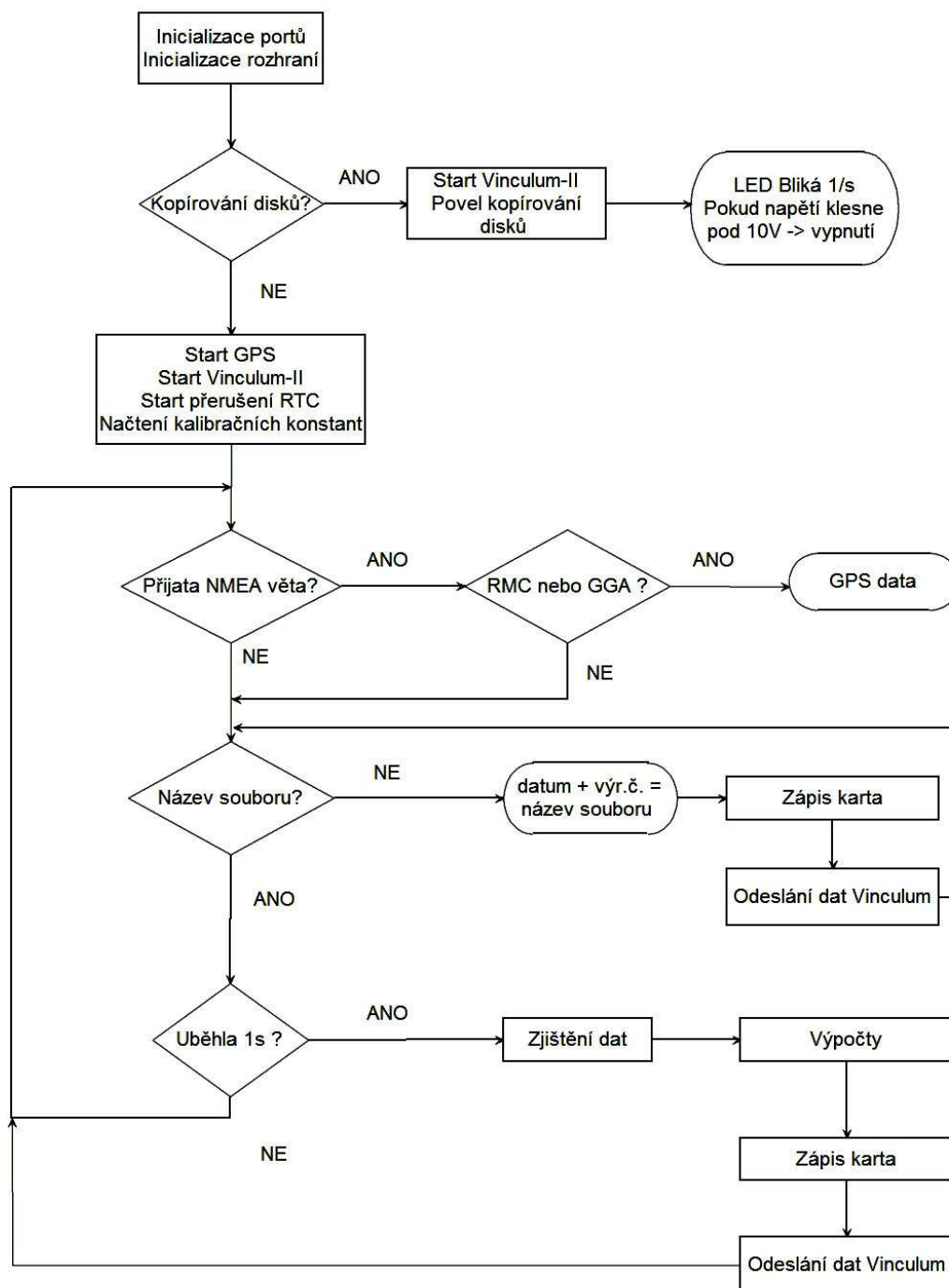


Obrázek 3.3 Programátor a debugger mikroProg.

Další velkou výhodou kompilátoru je velké množství integrovaných knihoven pro ovládání většiny periférií, jakož i knihovny pro práci s řetězci, a matematické knihovny apod.

3.4.2 Firmware a modul reálného času

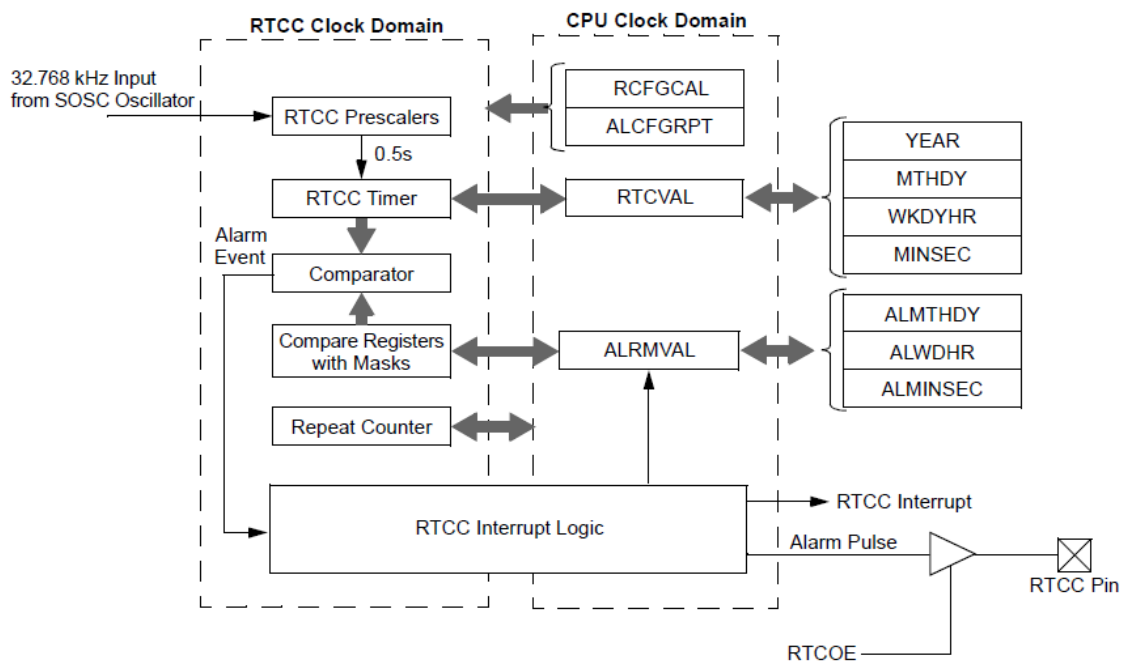
Základní schéma firmware v kontroléru PIC je na obrázku 3.4. Obsluha jednotlivých periférií a zpracování dat z nich získaných popisují následující kapitoly.



Obrázek 3.4 Základní schéma firmware mikrokontroléru.

Potřeba přesného časování je v tomto projektu nasnadě. V prvotních plánech bylo využít externího obvodu reálného času, nicméně nakonec se jevila jako nejvýhodnější varianta využít modulu reálného času obsaženého v mikrokontroléru (RTCC)(Obrázek 3.5). Z hlediska hardware je nutné pro využívání RTCC modulu připojit k mikrokontroléru sekundární krystal s frekvencí 32,768 kHz. Po nastavení příslušných registrů generuje RTCC modul přerušení v sekundových intervalech, tedy

periodě zapisování dat. Pokud modulu nezajistíme napájení ze záložní baterie během odpojení od hlavního zdroje napájení, dojde ke ztrátě registrů o již proběhlém čase. Tohoto faktu jsem se rozhodl využít a získal jsem tím přesný údaj o době běhu zařízení od posledního resetu. Pro tento projekt se nepředpokládá doba běhu delší než jeden den, proto stačí získávat informace o počtu uběhnutých sekund, minut a hodin. Tyto informace jsou uloženy ve dvou 16 bitových registrech, konkrétně v registru WKDYHR pro hodiny, respektive MINSEC pro minuty a sekundy.[14]



Obrázek 3.5 Základní blokové schéma obvodu reálného času mikrokontroléru. Převzato z [14].

Hodnoty jsou uloženy v jednotlivých registrech v BCD kódu. Pro převod z formátu BCD jsem použil vestavěnou knihovnu. Funkce na získání a zpracování doby běhu je následující:

```
void rtc_get(){
    RTCWREN_bit=1; // povolení úprav
    if (!RTCSYNC_bit) // probíhající synchronizace?
    {
        RTCPTR_0_bit=1; // nastavení ukazatele na registr
        RTCPTR_1_bit=0; // nastavení ukazatele na registr
        rtc_wh=RTCVAL; // čtení registru WKDYHR,
        // ukazatel automaticky -1
        rtc_ms=RTCVAL; // čtení registru MINSEC
    }
    RTCWREN_bit=0; // zakázání úprav
    rtc_s= bcd2dec(rtc_ms & 0xFF); // zpracování hodnot
    rtc_m= bcd2dec((rtc_ms>>8) & 0xFF) ; // zpracování hodnot
    rtc_h= bcd2dec(rtc_wh & 0xFF); // zpracování hodnot
}
```


3.5 GPS modul a jeho obsluha

Jelikož velké množství informací získávám z GPS modulu, byl výběr vhodného modulu, komunikace s ním a zpracování dat z tohoto modulu první věc, co jsem udělal. Z mnoha modulů nabízených na trhu jsem vybral cenově dostupný modul s dostatečnou přesností a malými rozměry i hmotností. Modul vyrábí firma HopeRF a nabízí ho pod názvem GOPS04. Komunikace s modulem probíhá přes rozhraní UART. Vzhledem k tomu, že do modulu není potřeba zasílat žádná data, stačí nám na propojení s MCU pouze datový výstup z modulu a reset pin, kterým se dá ovládat zapínání modulu. GPS modul pro svou správnou funkci potřebuje pouze záložní baterii pro zálohování obvodu reálného času a tím urychlení přechodu do aktivního režimu. Dále je potřeba připojit aktivní anténu pro příjem GPS signálu (Obrázek 3.6). Modul je napájen napětím 3,3 V a proudem přibližně 50 mA v normálním režimu a asi 70 mA v režimu hledání satelitů.[18]



Obrázek 3.6 GPS anténa. Převzato z [20].

Modul standardně komunikuje na rychlosti 9600 baudů a zasílá některé NMEA věty. Zjistil jsem, že pro získání všech potřebných dat z GPS modulu je potřeba zpracovat dva typy zpráv. Jsou to věty typu RMC (*Recommended Minimum Specific GNSS Data* – Doporučené minimum specifických GNSS dat) a GGA (*Global Positioning System Fix Data* – Data pozice GPS). Větu typu GGA využívám pouze pro získání údaje o GPS výšce a času, ke kterému je tato výška platná. Příklad a struktura GGA věty (převzato a přeloženo z [18])(Tabulka 3-1):

Struktura:

```
$GPGGA,hhmmss.sss,ddmm.mmmm,a,ddmm.mmmm,a,x,xx,x.x,x.x,M,,,xxxx*hh<CR><LF>
```

```
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11  
Příklad: $GPGGA,111636.932,2447.0949,N,12100.5223,E,1,11,0.8,118.2,M,,,0000*02<CR><LF>
```

Pole	Jméno	Příklad	Popis
1	UTC čas	111636.932	UTC čas ve formátu hhmmss.sss, (000000.000 ~ 235959.999)
2	Zem. šířka	2447.0949	Zeměpisná šířka ve formátu ddmn.mmmn
3	N/S indikátor	N	'N' = Severní polokoule, 'S' = Jižní polokoule
4	Zem. délka	12100.5223	Zeměpisná délka ve formátu dddmm.mmmn
5	E/W indikátor	E	'E' = Východní polokoule, 'W' = Západní polokoule
6	Indikátor kvality GPS signálu	1	Indikátor kvality GPS signálu 0: není určena poloha 1: platná poloha, SPS mód 2: platná ploha, diferenční GPS mód 3: GPS PPS Mód, pozice platná 4: Real Time Kinematic. 5: Float RTK6: Estimated (dead reckoning) Mode 7: Manuální režim 8: Simulační mód
7	Počet použitých satelitů	11	Počet použitých satelitů, (00 ~ 12)
8	HDOP	0.8	Horizontal dilution of precision, (00.0 ~ 99.9)
9	Výška	108.2	Výška nad střední hladinou moře v metrech (geoid), (-9999.9 ~ 17999.9)
10	DGPS Station ID	0000	ID diferenční stanice, 0000 ~ 1023 NULL když DGPS není použita
11	Kontrolní součet	02	

Tabulka 3-1: NMEA věta GGA. Převzato a přeloženo z [18].

Pro získání ostatních dat z GPS modulu využívám větu RMC. Získaná data jsou čas, status GPS, údaje o poloze, tedy zeměpisnou šířku spolu s identifikátorem polokoule a zeměpisnou délku spolu s indikátorem polokoule, rychlost nad zemí a kurz nad zemí. Příklad a struktura RMC věty (převzato a přeloženo z [18]) (Tabulka 3-2):

Structure:

\$GPRMC,hhmmss.sss,A,ddmm.mmmn,a,ddmm.mmmn,a,x.x,x.x,ddmmy,.,,a*hh<CR><LF>

Example: \$GPRMC,111636.932,A,2447.0949,N,12100.5223,E,000.0,000.0,030407,.,,A*61<CR><LF>

Pole	Jméno	Příklad	Popis
1	UTC čas	0111636.932	UTC čas ve formátu hhmmss.sss, (000000.000 ~ 235959.999)
2	Status	A	Status V=Data nejsou platná A=Data jsou platná
3	Zem. šířka	2447.0949	Zeměpisná šířka ve formátu ddmn.mmmn
4	N/S indikátor	N	'N' = Severní polokoule, 'S' = Jižní polokoule
5	Zem. délka	12100.5223	Zeměpisná délka ve formátu dddmm.mmmn
6	E/W indikátor	E	'E' = Východní polokoule, 'W' = Západní polokoule
7	Rychlost nad zemí	000.0	Rychlost nad zemí v uzlech (000.0 ~ 999.9)
8	Kurz nad zemí	000.0	Kurz nad zemí ve stupních (000.0 ~ 359.9)
9	UTC Datum	030407	UTC datum, ddmmyy formát
10	Indikátor módu	A	Indikátor módu 'N' = Data nejsou platná 'A' = Autonomní mód 'D' = Diferenční mód 'E' = Výpočtový mód 'M' = Manuální režim 'S' = Simulační mód
11	Kontrolní součet	61	

Tabulka 3-2: NMEA věta RMC. Převzato a přeloženo z [18].

GPS modul vysílá věty v sekundovém intervalu, je tedy potřeba věty přijmout, rozhodnout se zda je přijatá věta ta, kterou využijeme a poté ji zpracovat. Příjem dat je realizován v přerušení při příjmu UART dat. Při příjmu znaku \$ kterým začíná každá NMEA věta se vynuluje buffer do kterého jsou následně ukládány všechny přijaté znaky až do okamžiku příjmu znaku CR (ASCII kód 13), kterým NMEA věta končí, a celá přijatá NMEA věta se zkopíruje do pomocné proměnné, aby nemohlo dojít k přepisu dat během jejich zpracování. Následně zkontrolujeme dle návěstí zprávy, zda se jedná o zprávu typu RMC nebo GGA nebo nějakou jinou. Podle typu zprávy se z ní pomocí parsovací funkce získají požadovaná data, nebo se nezpracovává, pokud nejde o námi požadované zprávy. Data z NMEA vět se ukládají pro pozdější zápis na datová úložiště.

3.6 Datová úložiště

Jelikož samotný mikrokontrolér nemá paměť pro uchování dat po přerušení napájení, bylo nutné tuto paměť realizovat externě. Z hlediska volných periférií a možnosti komunikace se mi jako nejvhodnější jevila paměť od firmy Microchip s označením 24AA08. Tato paměť komunikuje po rozhraní I2C a má kapacitu 8 kB. Velikost dat ukládaných v této paměti je pouze v jednotkách bytů, nicméně tuto velikost paměti jsem volil s ohledem na další možnosti rozšíření firmware a tedy i funkčnosti celého zařízení. Vzhledem ke kompatibilitě pamětí řady 24AA v komunikačním protokolu i pouzdře je možné v budoucnu nahradit 8kB paměť jinou velikostí paměti. Do této paměti jsou ukládány kalibrační konstanty pro akcelerometr, výšku a rychlost. Dále je zde také uchováno výrobní číslo produktu.

Jak již napovídá název práce, nejdůležitější funkcí zařízení je uchovávání získaných dat o letu, motoru a okolí. Nejprve jsem provedl rozvahu, jak velký objem dat bude potřeba ukládat. Výsledkem bylo, že je potřeba ukládat přibližně 140 bytů dat v jednom zápisu. To nám při frekvenci zapisování 1x za sekundu dává potřebu cca 500 kiB dat za hodinu. Plánovaná životnost zařízení je 2 000 h provozu, tedy asi 1 GiB dat. Z těchto důvodů jsem zvolil jako ukládací médium paměťovou kartu. Jako nejvhodnější z hlediska rozměrů a váhy, v neposlední řadě také komunikačnímu rozhraní SPI, se ukázala mikroSD karta. Jako záložní datové úložiště jsem vybral USB flash disk, který se vyrábí i v miniaturních provedeních. Pokud by tedy došlo k poruše jednoho z paměťových médií, o data nepřijdeme, neboť se ukládají paralelně na dvě nezávislá média.



Obrázek 3.7 Datová úložiště mikro SD a USB disk použité při řešení.

Z hlediska uživatele je potřeba naměřená data nějakým způsobem získat ze zapisovače a zpracovat a vyhodnotit je v počítači. Jako nejlepší varianta se mi jevílo pouhé připojení externího USB flash disku k zapisovači přes konektor vyvedený na povrchu zapisovače. Získání dat je možné dvěma způsoby. Pokud chceme data z letu, a předem to víme, je možné před zapnutím palubní sítě letadla (a tedy zapnutím zapisovače) připojit flash disk a data jsou ukládána po celou dobu i na tento disk. Pokud chceme získat data zpětně, je nutné připojit disk opět před zapnutím zapisovače a poté při zapnutí podržet stisknuté tlačítko na těle zapisovače. Tím se spustí režim kopírování dat, ve kterém se pouze zkopíruje obsah vnitřního USB flash disku na připojený USB flash disk. Během této operace zapisovač nezapisuje žádná data ani neprovádí žádné jiné operace. Dokončení kopírování je signalizováno LED diodou na zapisovači. Tato operace může být časově náročná v závislosti na objemu kopírovaných dat. Při kopírování se na cílovém disku vytvoří složka ZLD_xxxx, kde xxxx je pořadové číslo složky, pokud bylo již na tento disk kopírováno a do ní se zkopíruje celý obsah zdrojového disku.

Jednotlivé soubory jsou ve formátu csv, což je formát jednoduše zpracovatelný jak tabulkovými procesory, prohlížeči textu apod., tak se s ním pracuje dobře i z hlediska zápisu a čtení pomocí mikrokontrolerů. Název souboru je ve formátu rmmddaa.csv, kde rr je rok, mm je měsíc, dd je den pořízení záznamu a aa je hexadecimální kód zapisovače, na kterém byl záznam pořízen. Pokud by se tedy ocitlo několik souborů na jednom místě, je možné rozlišit, který záznam je ze kterého zapisovače.

Data se do souboru zapisují po řádcích, kdy každý řádek obsahuje data v tomto pořadí (Tabulka 3-3):

Název pole	Formát	Příklad	Popis
datum	dd-mm-rrrr	17-05-2013	Datum záznamu
čas pozice	hh:mm:ss	15:49:37	čas získání pozice
pozice	add°mm.mmmm add°mm.mmmm	E016°25.8516 N49°20.2305	pozice GPS
status GPS	a	A	status GPS: A - platná data V - neplatná data
kurz	xxx.x	296.0	kurz letu ve [°]
rychlost GPS	xxx.x	041.1	rychlost letu vůči zemi [kt]
čas výška GPS	hh:mm:ss	15:49:37	čas získání GPS výšky
výška GPS	xxxx.x	254.6	GPS výška [m]
satelity	xx	07	počet používaných satelitů
čas běhu	hh:mm:ss	00:01:04	doba běhu od posledního resetu
rychlost	x.x	0	rychlost letu vůči okolnímu vzduchu [km/h]
tlaková výška	x.x	1245.4	výška AMSL [ft]
tlak vzduchu	x.x	97035.5	tlak vzduchu [Pa]
zrychlení x	x.xx	-0.69	zrychlení v ose x [g]
zrychlení y	x.xx	0.25	zrychlení v ose y [g]
zrychlení z	x.xx	-0.88	zrychlení v ose z [g]
napájení	a	M	zdroj napájení zařízení: M - hlavní síť B - baterie
síť	xx.xx	11.86	napětí hlavní sítě napájení [V]
baterie	xx.xx	0.00	napětí záložní baterie [V]
RPM	x	0	otáčky motoru [rpm]
hlava	x	23	teplota hlav motoru [°]
OAT	x.xx	19.25	teplota okolního vzduchu [°]

Tabulka 3-3: Struktura a formát ukládaných dat.

Příklad zapisované věty:

17-05-2013,15:49:37,E016°25.8516 N49°20.2305,A,296.0,041.1,15:49:37,254.6,07,00:01:04,0,1245.4,97035.5,-0.69,0.25,-0.88,M,11.86,0.00,0,23,19.25

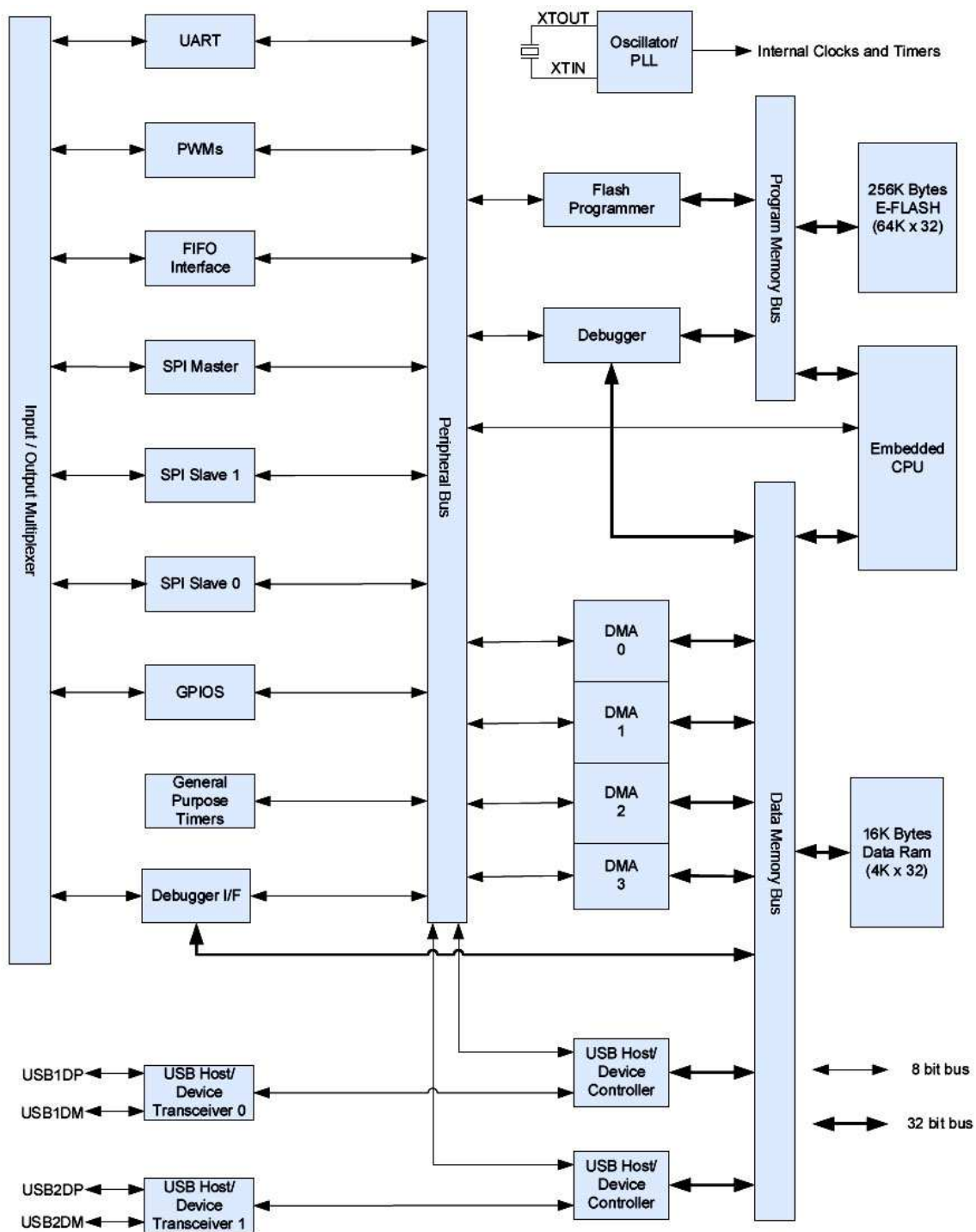
Některá čidla jsou volitelná a pokud tedy nebudou instalována, nebude se příslušná hodnota zaznamenávat a zaznamená se místo ní hodnota 0, aby byl dodržen výše uvedený formát zaznamenaných dat.

Tato data se ukládají jak na mikro SD kartu, tak se posílají pomocí rozhraní UART do čipu Vinculum-II, kde se ukládají na jeden popř. oba USB disky, a paralelně do servisního PC pokud je připojen.

3.7 Vinculum-II

Pro obsluhu USB disků jsem zvolil USB kontrolér Vinculum-II od firmy FTDI (Obrázek 3.8). Tento USB host kontrolér má 16 bitovou architekturu, dva USB 2.0 host porty a komunikace s ním je možná pomocí rozhraní UART nebo SPI. Tento kontrolér má vnitřní paměť o velikosti 256 kB a 16 kB RAM paměti. Vyrábí se ve třech variantách podle počtu využitelných vstupně-výstupních pinů. Pro tento projekt jsem zvolil nejmenší variantu, tedy 32 pinů, v pouzdře LQFP-32. Toto pouzdro opět umožňuje osazení na desku bez většího technického vybavení.

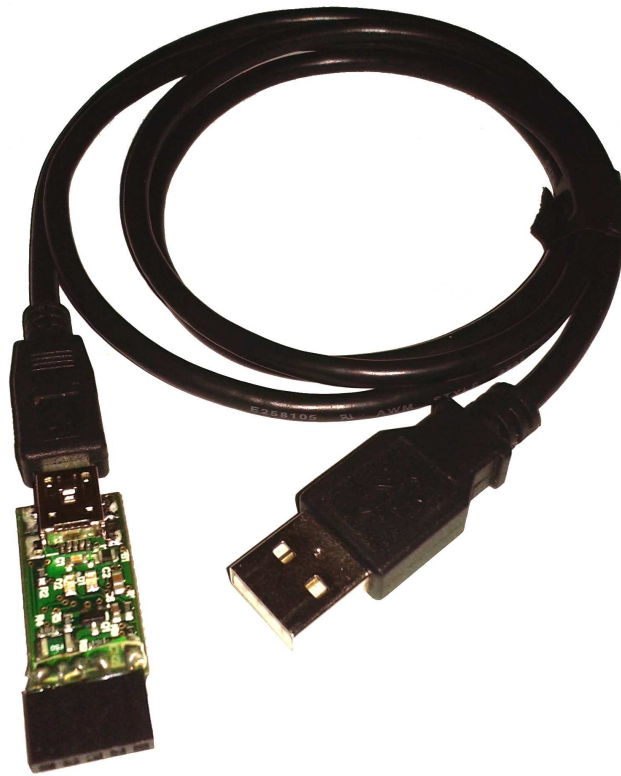
Výrobce na svých stránkách poskytuje několik možných firmware pro tento mikrokontrolér. Pokud si uživatel chce přizpůsobit firmware, je pro něj přichystáno vývojové prostředí s kompilerm. Program do kontroléru je možné psát v assembleru nebo v jazyku C. Tento kontrolér pracuje s operačním systémem reálného času a v multi-tasking režimu. V tomto projektu je tento kontrolér využit pouze pro obsluhu USB disků vzhledem k tomu, že jeho výkon a počet periférií by nestačil na obsluhu všech požadavků na zapisovač letových dat.



Obrázek 3.8 Základní blokové schéma architektury Vinculum-II. Převzato z [16].

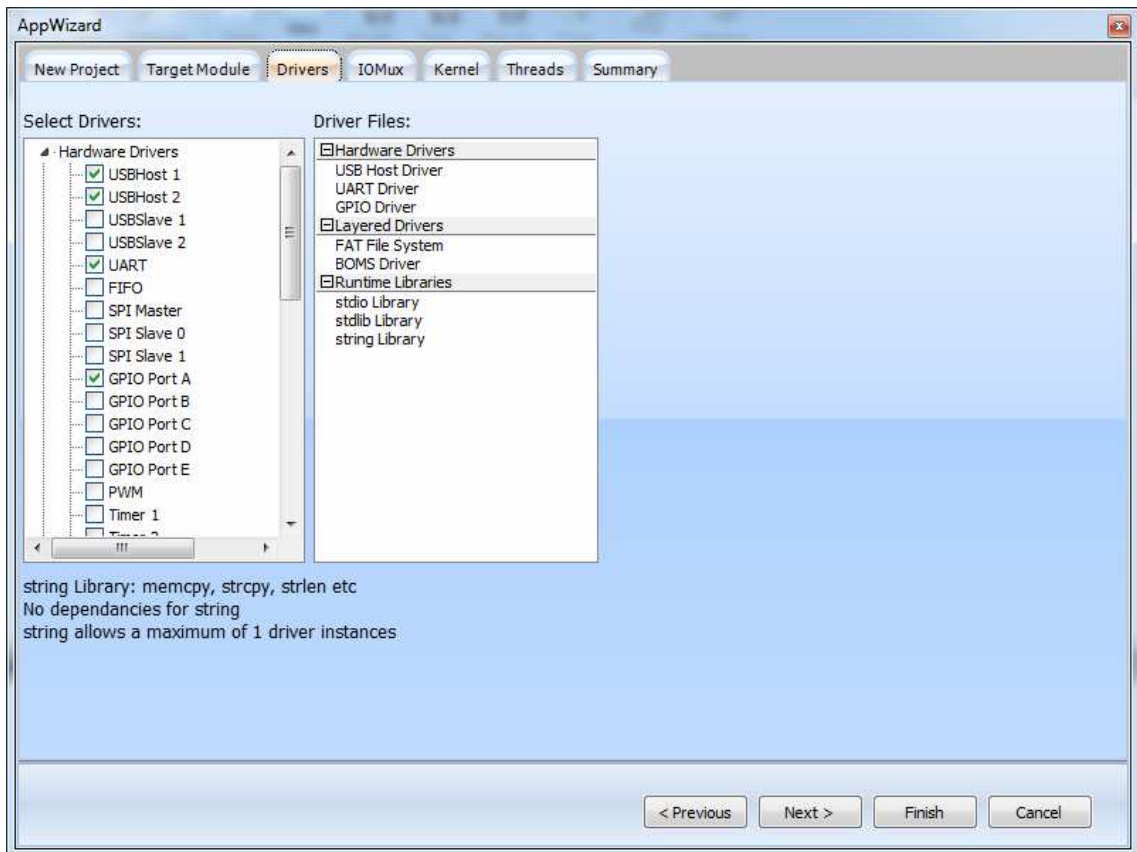
3.7.1 Vývojové prostředky Vinculum-II

Pro změnu firmware od výrobce nebo vývoj nového je přichystáno vývojové prostředí Vinculum II Toolchain. Toto vývojové prostředí obsahuje kromě samotného kompilera také debugger pro odladění firmware. K obvodu se připojujeme pomocí VNC2 Debug Module. Počítač propojíme s tímto modulem pomocí mini USB kabelu, s obvodem je modul propojen pomocí pinové lišty. Na obrázku 3.9 je tento modul upravený z originálního, a to v připojovací části do obvodu, kde v originále je pinová lišta s roztečí 2 mm a po jejím odpadnutí během užívání jsem ji nahradil běžnější pinovou lištou s roztečí 2,54 mm, a zafixoval ji tavným lepidlem pro lepší mechanickou odolnost.



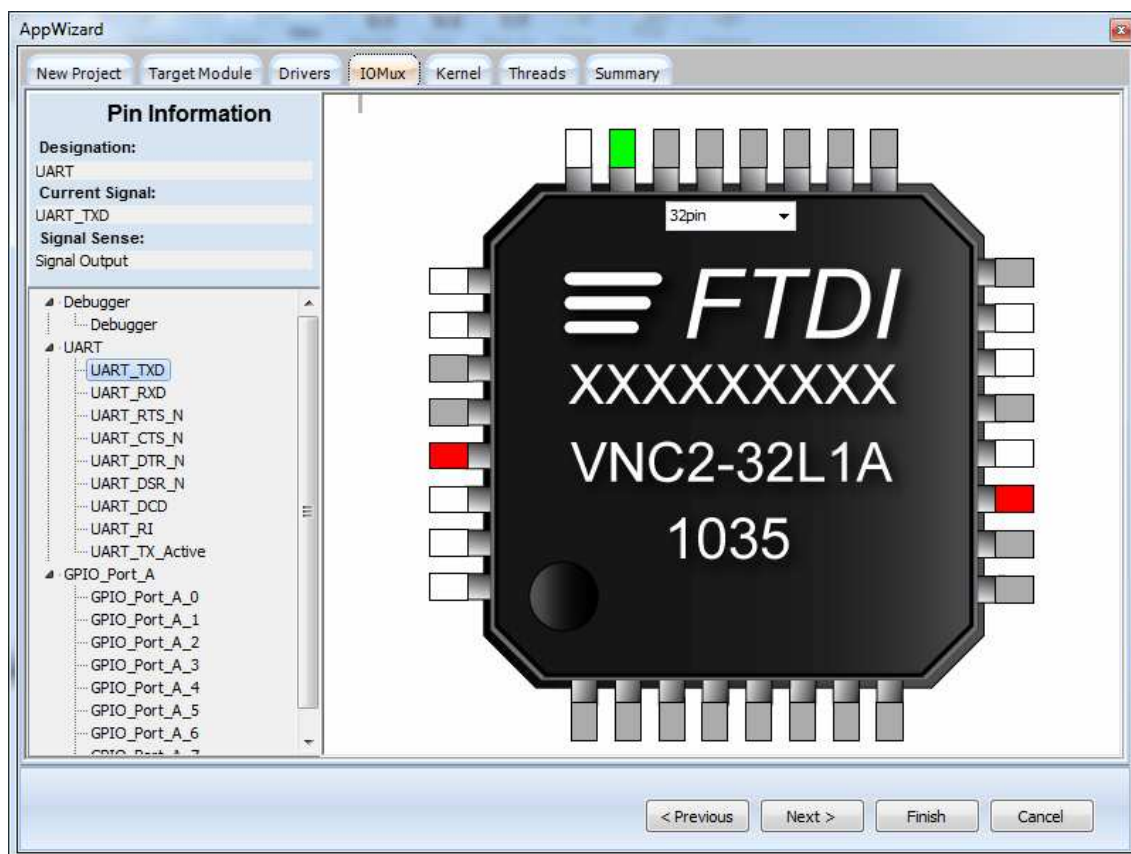
Obrázek 3.9 VNC2 Debug Module

Pokud chceme vytvořit nový projekt a nemáme s programováním čipu velké zkušenosti, je vhodné využít průvodce novým projektem. Ten nám v několika oknech pomůže nakonfigurovat základní parametry nového projektu a také nám na základě vybraných knihoven a ovladačů (Obrázek 3.10) a dalších vybraných údajů v průvodci vytvoří základní kostru kódu.



Obrázek 3.10 Průvodce novým projektem – okno ovladače a knihovny

Obrázek 3.11 nám ukazuje, jak v průvodci jednoduše přiřadíme jednotlivé periferie k pinům, podle toho, jak to vyhovuje našemu zamýšlenému použití. Po kliknutí na jednotlivé funkce v levé části obrazovky se nám na obrázku čipu označí zelenou barvou pole, ke kterému je funkce přiřazena a červeně pole, ke kterým je možné funkci přiřadit. Nakonec se nám toto nastavení opět vygeneruje do podoby kódu se kterým poté pracujeme, takže opět velká úspora času.



Obrázek 3.11 Průvodce novým projektem – okno nastavení pinů

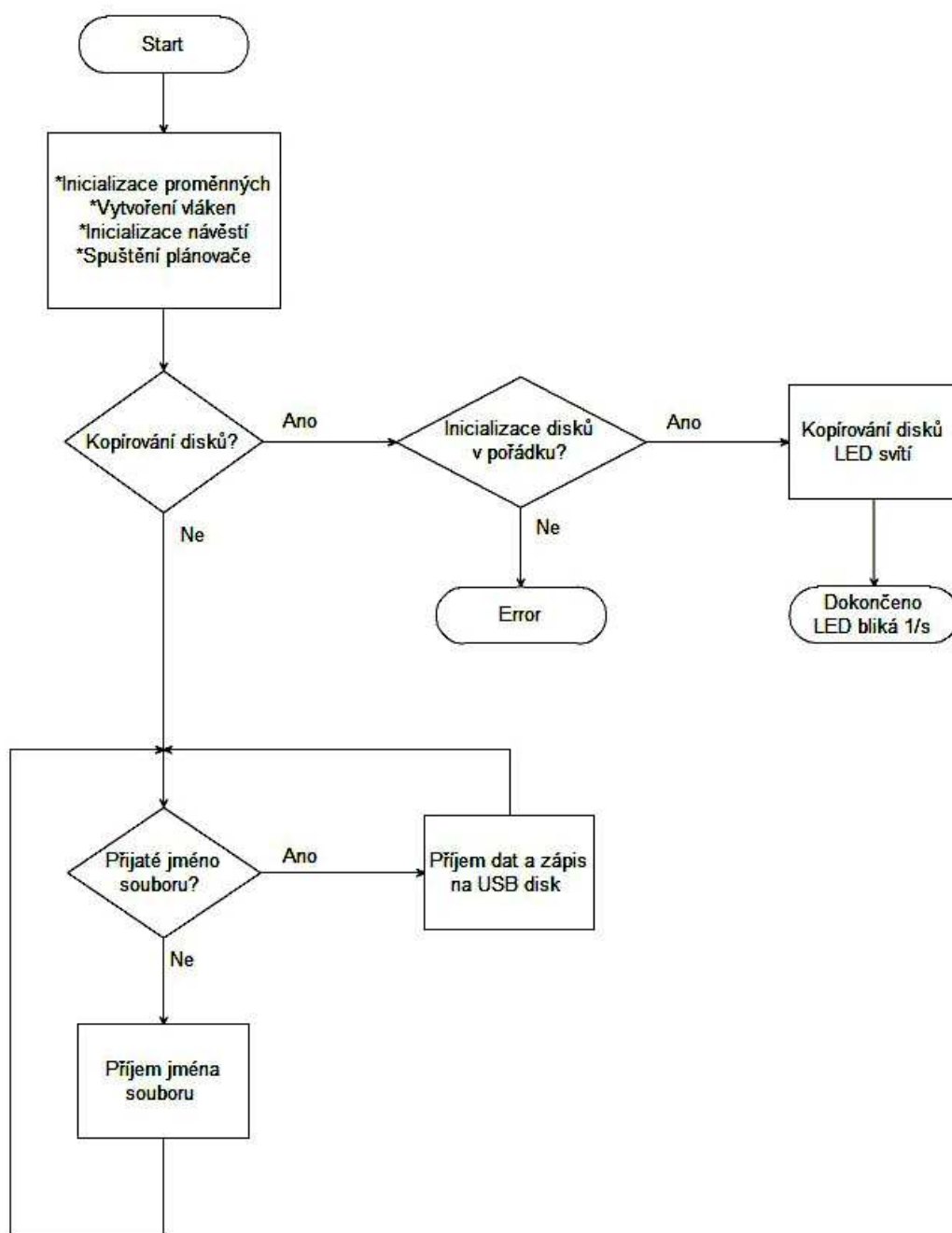
3.7.2 Tvorba firmware pro Vinculum-II

Při tvorbě firmware pro Vinculum-II jsem čerpal z příkladů a předchystaných firmware publikovaných na stránkách výrobce. Dalším neocenitelným pomocníkem byla kniha, publikovaná taktéž na stránkách výrobce, *Embedded USB design by example*.^[17] Jelikož jsem tento mikrokontrolér programoval poprvé, byla pro mne tato kniha základem. Jsou zde vysvětleny základy programování čipu a uvedeny mnohé příklady.

V zásadě si programování můžeme rozdělit do několika oblastí. V první části definujeme použité knihovny a globální proměnné. Poté následuje funkce `main`, ve které se inicializuje jádro systému, načtou se ovladače pro jednotlivé používané periferie a spustí jednotlivá vlákna programu do stavu čekání na povel k vykonání programu. Tento povel dávají návěstí, které se zde také inicializují.

Jednotlivá vlákna následují v programu za funkcí `main` a mohou využívat další uživatelem vytvořené funkce umístěné v této sekci, nebo funkce z knihoven. Je také nutné iniciovat všechny načtené ovladače pro periferie a přiřadit je k jednotlivým

ukazatelům. Na obrázku 3.12 je znázorněn vývojový diagram programu mikrokontroléru Vinculum-II. Rozhodnutí zda je nebo není v režimu kopírování disků se provádí na základě hodnoty vstupního pinu, přičemž tento pin je ovládán mikrokontrolérem PIC 24FJ64GA004.



Obrázek 3.12 Vývojový diagram firmware pro Vinculum-II

3.8 Vzdušná rychlost

Velice důležitým údajem pro let je vzdušná rychlost. Tato rychlost je snímána napojením na pitot-statický systém letadla pomocí čidla rozdílového tlaku MPX5010 od výrobce Freescale. Toto čidlo bylo vybráno pro jeho nízkou cenu, dostatečné rozlišení a přesnost. Další jeho velkou předností je pouzdro, které umožňuje napojení na pitot-statický systém letadla při zaručení těsnosti systému. Jak je ukázáno na obrázku 3.13 čidlo má dva vstupy pro napojení, tyto budou využity pro napojení pomocí hadiček na vstupní nástrčky celého ZLD. Čidlo pracuje na piezorezistivním principu a jeho výstupem je napětí v rozmezí 0,2 V – 4,7 V DC. Měřicí rozsah čidla je od 0 kPa do 10 kPa. Čidlo má také integrovanou teplotní kompenzaci. Výstupní napětí je funkcí rozdílového tlaku.[19]



Obrázek 3.13 Tlakové čidlo MPX5010DP. Převzato z [20].

Pro přenos mezi tlakem a napětím udává výrobce přepočtovou funkci ve tvaru

$$V_{out} = V_s (0,09 \cdot P + 0,04) \text{ [V]} \quad (3)$$

kde V_{out} je výstupní napětí čidla,
 V_s je napájecí napětí čidla,
 P je tlak přivedený na čidlo v kPa.

Vzhledem k tomu, že mikrokontrolér PIC pracuje s napětím 3,3 V a čidlo tlaku je napájeno 5 V, nebylo možné připojit výstup čidla přímo k vestavěnému ADC v MCU. Zkoušel jsem variantu s odporovým děličem, nicméně tento způsob byl značně

nepřesný, také díky tolerancím hodnot odporů, a při rozlišení 10 bit, které ADC v MCU má, byly získávané hodnoty nepoužitelné. Proto jsem musel použít externí AD převodník. Požadavky na tento AD převodník byly rozlišení 12 bitů a komunikace po rozhraní I2C. Vybral jsem převodník od firmy Microchip s označením MCP 3221. Tento převodník je schopen zpracovat výstup z tlakového čidla při velmi malé spotřebě a díky malému pouzdru je ideální pro tento projekt. Přes komunikační rozhraní I2C získáváme hladinu AD převodníku ve dvou bytech.[21]

Vstupní napětí V_{in} do AD převodníku vypočteme podle rovnice (4)

$$V_{in} = ADC \cdot \frac{V_s}{4096} \text{ [V]} \quad (4)$$

kde ADC je hladina AD převodníku,

V_s je napájecí napětí AD převodníku, v našem případě 5 V.

Úpravou a zkombinováním rovnic (2), (3) a (4) získáváme vztah pro výpočet rychlosti v

$$v = 3,6 \cdot \sqrt{4,4288 \cdot ADC - 725,624 + offset} \text{ [km/h]} \quad (5)$$

kde ADC je hladina AD převodníku,

$offset$ je kalibrační konstanta.

Jelikož nejsou všechna čidla, AD převodníky a jiné součásti měřicího řetězce vždy stejné, bylo nutné zavést kalibrační konstantu, kterou posuneme hodnotu rychlosti na správnou hodnotu.

Při rychlostech do 40 km/h byly hodnoty značně rozkolísané, jelikož změny tlaku nebyly velké. Proto jsem se rozhodl přidat do programu podmínku, že pokud je hodnota pod 40 km/h, bere se rychlost jako nulová.

3.9 Tlaková výška

Stejně jako vzdušná rychlost se i tlaková výška měří napojením na pitot-statický systém letadla. Konkrétně se napojuje na větev statického tlaku. Při výběru čidla jsem se nejdříve poohlédl u výrobce Freescale, protože od něj používám v tomto projektu čidlo diferenčního tlaku. Výrobce čidla absolutního tlaku vyrábí a také v pouzdrě, které je velmi podobné pouzdru snímače diferenčního tlaku. Senzor má označení MPX5100AP (Obrázek 3.14). Rozsah měření je u tohoto čidla od 15 kPa do 115 kPa.

Výstup čidla je opět napětí v rozsahu 0,2 V až 4,7 V a i toto čidlo v sobě obsahuje teplotní kompenzaci. Oba typy použitých čidel mají kalibraci. [22]



Obrázek 3.14 Tlakové čidlo MPX5100AP. Převzato z [20].

Přepočtová funkce je v případě tohoto čidla vyjádřena vztahem (6)

$$V_{out} = V_s (0,009 \cdot P - 0,095) \text{ [V]} \quad (6)$$

kde V_{out} je výstupní napětí čidla,
 V_s je napájecí napětí čidla,
 P je tlak přivedený na čidlo v kPa.

Pomocí rovnic (4) a (6) získáme vztah (7) pro výpočet tlaku p

$$p = 27,1267 \cdot ADC + 10555,56 \text{ [Pa]} \quad (7)$$

kde ADC je hladina AD převodníku.

Tento tlak je zaznamenán, a je také použit pro výpočet tlakové výšky, resp. letové hladiny.

Pro přepočítání tlaku mezi rozdílnými výškami je použita tzv. barometrická rovnice (8) [23]

$$p = p_0 \cdot e^{\left(-\frac{g \cdot M \cdot h}{R \cdot T_0}\right)} \text{ [Pa]} \quad (8)$$

kde p je tlak v dané hladině,

$p_0 = 101325 \text{ Pa}$ je tlak ve výchozí hladině, pro výpočet tlak na hladině moře,

$g = 9,80665 \text{ m/s}^2$ je gravitační zrychlení,

$M = 0,0289644 \text{ kg/mol}$ je molární hmotnost vzduchu,

h rozdíl výšek hladin v metrech,

$R = 8,314 \text{ J/(mol}\cdot\text{K)}$ je univerzální plynová konstanta,

$T_0 = 288,15 \text{ K}$ je teplota ve výchozí hladině.

Úpravou, dosazením do (8) a převodem výsledku z metrů na stopy získáváme finální vzorec pro výpočet nadmořské výšky(9)

$$h = -(\ln(p) - 11,5261) \cdot 27671,23 + \text{offset} \text{ [ft]} \quad (8)$$

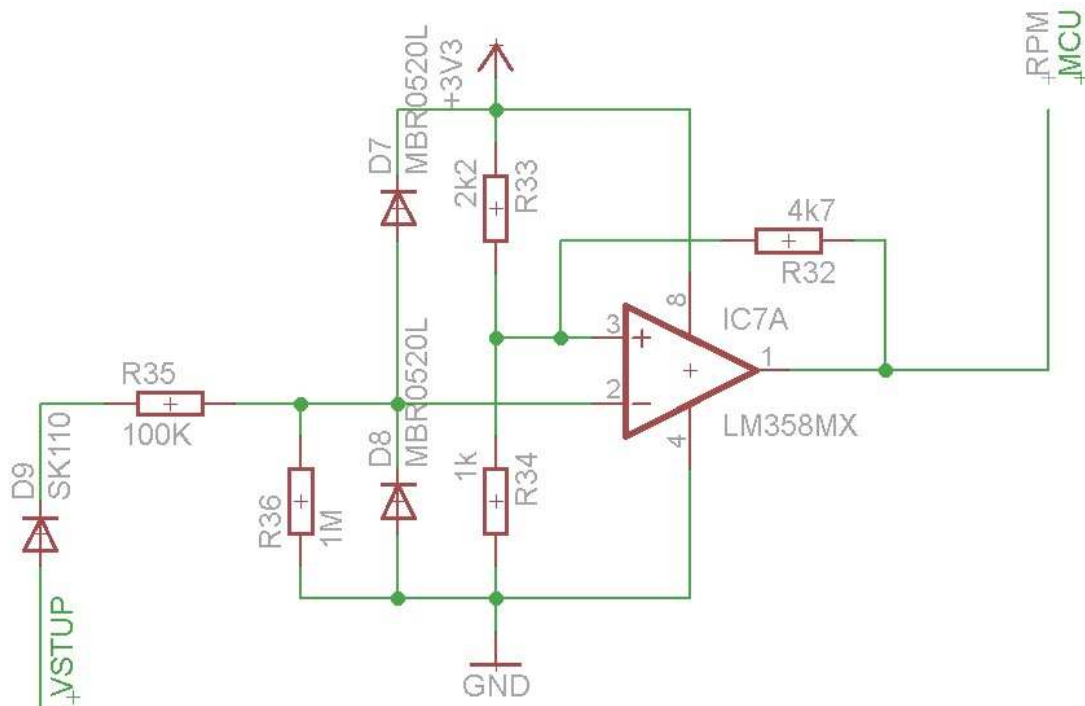
kde p je tlak v dané hladině,

offset je kalibrační konstanta.

I zde bylo nutné zavést kalibrační konstantu pro nastavení správné hodnoty zjišťované výšky.

3.10 Otáčky motoru

Snímání otáček z motorů ROTAX je realizováno pomocí komparátoru s hysterezí, který je tvořen dle schématu na obrázku 3.15. Snímané pulsy mají velikost od přibližně 12 V do asi 80 V (viz obrázek 2.7).



Obrázek 3.15 Schéma obvodu snímání otáček.

Po úpravě signálu jej přivedeme na vstupní pin mikrokontroléru, na kterém je namapováno přerušení z vnějšího zdroje. Přerušení reaguje na sestupnou hranu pulsu. Po vygenerování přerušení se zvýší proměnná *rpm_tmp* o jedna a vynuluje se příznak přerušení. Při přerušení vyvolaném RTCC 1 x za sekundu se vypočtou otáčky za minutu (RPM) dle rovnice (9)

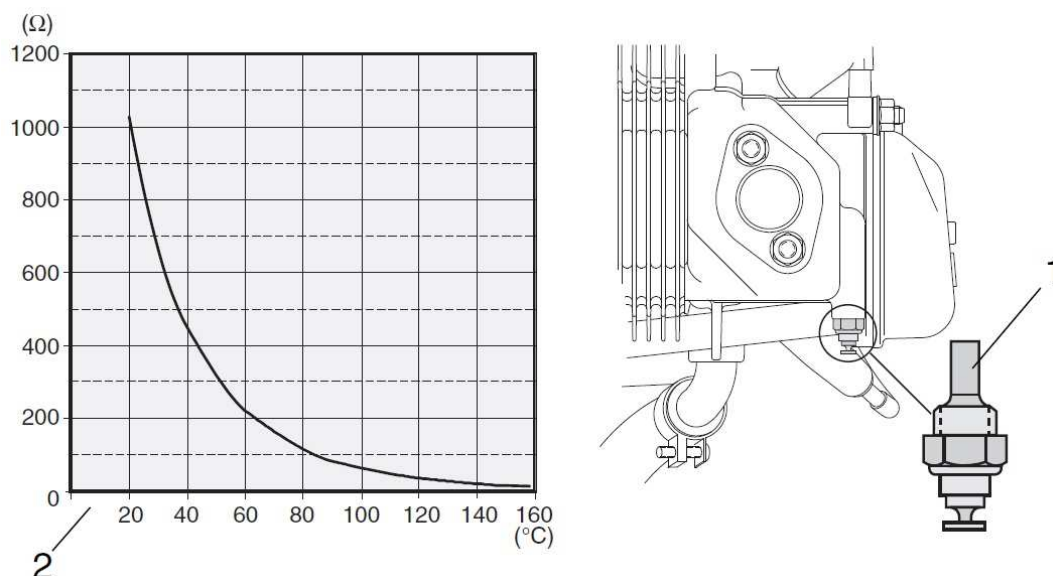
$$rpm = 60 \cdot rpm_tmp \quad [-] \quad (9)$$

a vynuluje se hodnota proměnné *rpm_tmp*.

Tímto způsobem detekce a výpočtu je dáno, že přesnost určení otáček je ± 60 ot./min, tedy rozlišení jeden impuls na vstupu.

3.11 Teplota hlav motoru

Pro měření teploty hlav se používá odporové čidlo. Jeho charakteristika a umístění je vidět na obrázku 3.16.



Obrázek 3.16 Senzor teploty hlav, jeho umístění (1); závislost odporu na teplotě (2). Převzato z [10].

Jako vstup pro výpočet teploty hlav je úbytek napětí na čidle snímané pomocí ADC modulu mikrokontroléru. Kvůli omezení protékajícího proudu přes pin mikrokontroléru byl vytvořen odporový dělič, kdy k čidlu byl přidán odpor o hodnotě 1 kΩ. Odečtem z grafu a výpočtem byl zjištěn vzorec pro výpočet teploty hlav (10)

$$T = -35 \cdot \ln(\text{adc_teplota} \cdot 0,00322266) + 41 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (10)$$

kde *adc_teplota* je zjištěná hladina AD převodníku.

3.12 Okolní teplota

Další teplota, která se v rámci zařízení měří a zaznamenává je teplota okolního vzduchu (OAT – outside air temperature). Pro realizaci snímání této teploty jsem vybral čidlo od firmy Maxim integrated products s označením DS18B20. Toto čidlo komunikuje po rozhraní 1-Wire. Malé rozměry a jednoduché připojení jsou další přednosti tohoto čidla. Nejsou nutné žádné další součástky pro chod čidla, pouze je potřeba přidat zdvihový odpor 4,7 kΩ na komunikační linku. Čidlo má programovatelnou přesnost měření od 9 do 12 bitů. [24]



Obrázek 3.17 Teplotní čidlo DS18B20. Převzato z [20].

Nejprve je nutné čidlo iniciovat a nastavit požadované rozlišení. Toto provede při každém startu následující funkce

```
void DS18B20_init()
{
    Ow_Reset(&PORTC, 6); // Reset signál
    Ow_Write(&PORTC, 6, 0xCC); // Příklad SKIP_ROM
    Ow_Write(&PORTC, 6, 0x4E); // Příklad nastavení Th+Tl+config
    Ow_Write(&PORTC, 6, 0x00); // Th
    Ow_Write(&PORTC, 6, 0x00); // Tl
    Ow_Write(&PORTC, 6, 0x3F); // config - 10bit rozlišení
}
```

Poté se v každém cyklu získávání a zapisování dat čtou data z čidla a získává teplota podle funkce:

```
float DS18B20_teplota()
{
    Ow_Reset(&PORTC, 6); // Reset signál
    Ow_Write(&PORTC, 6, 0xCC); // Příklad SKIP_ROM
    Ow_Write(&PORTC, 6, 0x44); // Příklad CONVERT_T
    Delay_us(120); // Doba nutná pro převod T
    Ow_Reset(&PORTC, 6); // Reset signál
    Ow_Write(&PORTC, 6, 0xCC); // Příklad SKIP_ROM
    Ow_Write(&PORTC, 6, 0xBE); // Příklad READ_SCRATCHPAD
    temp = Ow_Read(&PORTC, 6); // čtení prvního byte
    temp = (Ow_Read(&PORTC, 6) << 8) + temp; // čtení druhého byte

    if (temp & 0x8000) // kontrola záporné teploty
    {
        temp = ~temp + 1; // převod na kladné číslo
        negative = -1; // nastavení koeficeintu
    }
    else
    {
        negative = 1; // nastavení koeficeintu
    }

    temp_out = temp >> 4; // získání celé části
    temp_fraction = temp >> 2; // získání desetinné části
}
```

```

temp_fraction &= 0x03; // získání desetinné části
temp_out = temp_out + temp_fraction * 0.25; // výpočet teploty
temp_out *= negative; // výpočet teploty

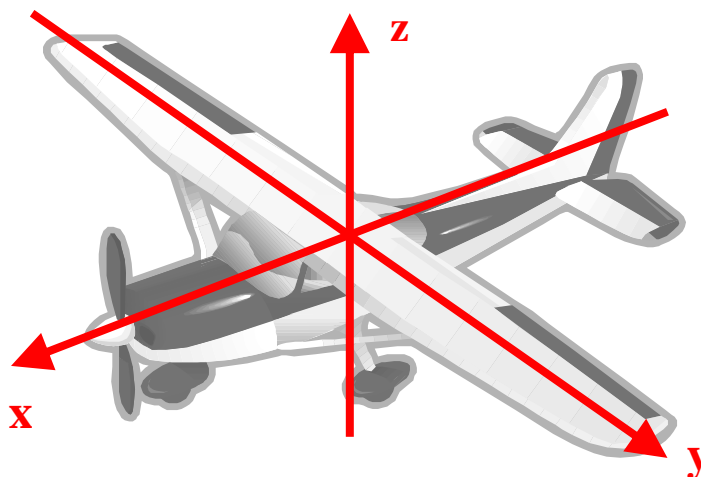
return temp_out; // zjištěná teplota
}

```

3.13 Akcelerometr

Pro měření zrychlení jsem vybral senzor MMA7455L od Freescale Semiconductor. Toto čidlo zrychlení komunikuje po rozhraní I2C a má programovatelné rozlišení $\pm 2 \text{ g}$ / $\pm 4 \text{ g}$ / $\pm 8 \text{ g}$ a snímá zrychlení ve třech osách. Dodává se v pouzdře LGA-14, tudíž je velmi malý a lehký.

Pro zjištění aktuálního zrychlení pošleme po lince I2C příkaz pro přepnutí do měřicího módu s rozsahem $\pm 8 \text{ g}$ a následně vyčteme hodnoty zrychlení pro jednotlivé osy dle obrázku 3.18. S určením os souvisí také umístění zapisovače v letadle. Zapisovač by se měl umístit co nejblíže k těžišti, čelním panelem ve směru letu a úchyty směrem k zemi.



Obrázek 3.18 Určení os akcelerometru vzhledem k letadlu.

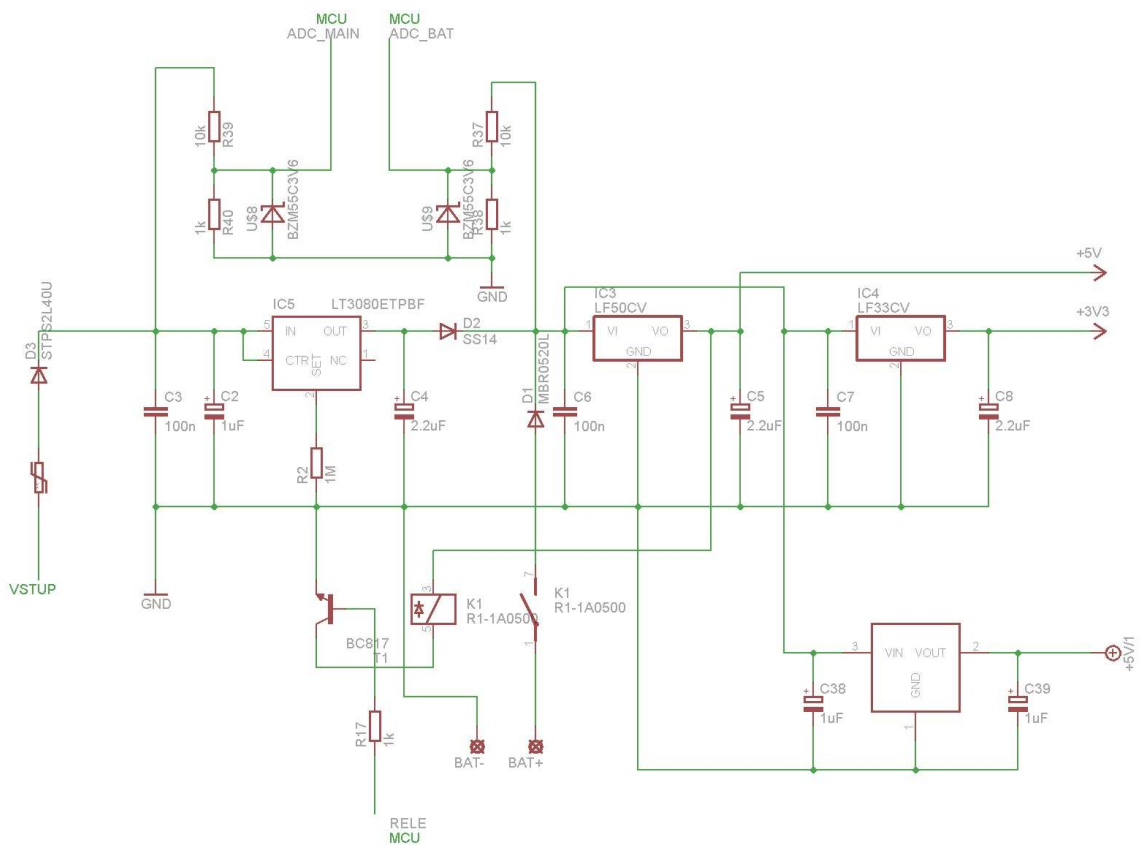
Ze senzoru vyčteme jen určitou hodnotu, kterou musíme přepočítat dle zvoleného rozsahu. I když je možné do senzoru nahrát kalibrační data, neuchovají se v paměti a bylo by nutné je tam opakovaně nahrávat. Proto jsem zvolil kalibrační konstanty v mikrokontroléru. Výslednou hodnotu zrychlení tedy vypočteme pro každou osu pomocí vzorce (11)

$$osa = 0,063 \cdot (osa_data + offset_osa) \text{ [g]} \quad (11)$$

kde osa je počítaná hodnota pro danou osu (x, y, z),
 osa_data je hodnota zjištěná ze senzoru pro danou osu,
 $offset_osa$ je kalibrační konstanta pro danou osu.

3.14 Napájení

V palubní síti UL letadel, pro které je zařízení určeno se nachází většinou napětí v rozmezí od 12 V do 30 V stejnosměrných. V zapisovači letových dat jsou potřeba tři různá napájecí napětí. Pro MCU, kartu, akcelerometr aj. je potřeba napájení 3,3 V, pro napájení USB disků je potřeba 5 V a pro snímače tlaku opět 5 V, ale přesných. Schéma napájecí části je na obrázku 3.19. Na vstupu je polymerová pojistka 750 mA a blokovácí dioda proti přepólování. Dále následuje stabilizátor na 9 V. Za ním jsou v jednom uzlu připojeny oba 5 V stabilizátory a stabilizátor 3,3 V. Do stejného uzlu je přes relé připojena i záložní baterie. Toto relé je ovládáno z MCU a slouží k vypnutí zařízení. Zařízení každou sekundu sleduje, zda je přítomno napájení ze sítě. Pokud není, zkontroluje se, zda je měřena nějaká rychlost vůči vzduchu (letadlo letí), nebo zda jsou otáčky motoru více jak 100 rpm. Pokud je splněna alespoň jedna podmínka, zařízení funguje na záložní baterii. Jakmile podmínky neplatí, zařízení ukončí svou činnost a vypne se. Během provozu na baterie bliká stavová LED na zapisovači 1/s.



Obrázek 3.19 Schéma napájení.

Měření napětí je realizováno pomocí odporového děliče 1:10 a AD převodníku v MCU. Stačí tedy změřené napětí násobit deseti a máme skutečné napětí. Takto se měří jak napětí palubní sítě, tak napětí baterie. Měření napětí baterie se provádí pouze při provozu na baterii, aby nedocházelo ke zbytečnému odběru z ní.

Záložní baterie je tvořena šesti bateriemi typu AAA v sériovém zapojení do jednoho akupacku (Obrázek 3.20). Takto vytvořená záložní baterie má napětí 9 V a měla by vydržet alespoň 10h napájet zařízení. Zjištěný odběr zařízení je do 250 mA. Zde je nutné zmínit, že zařízení při vypnutí pracuje na záložní baterii pouze 2-3 sekundy. Tato varianta byla zvolena oproti nabíjecí baterii pro svou nenáročnost na dobíjecí obvod, cenu a další výhody jako teplotní rozsah apod.



Obrázek 3.20 Akupack záložní baterie.

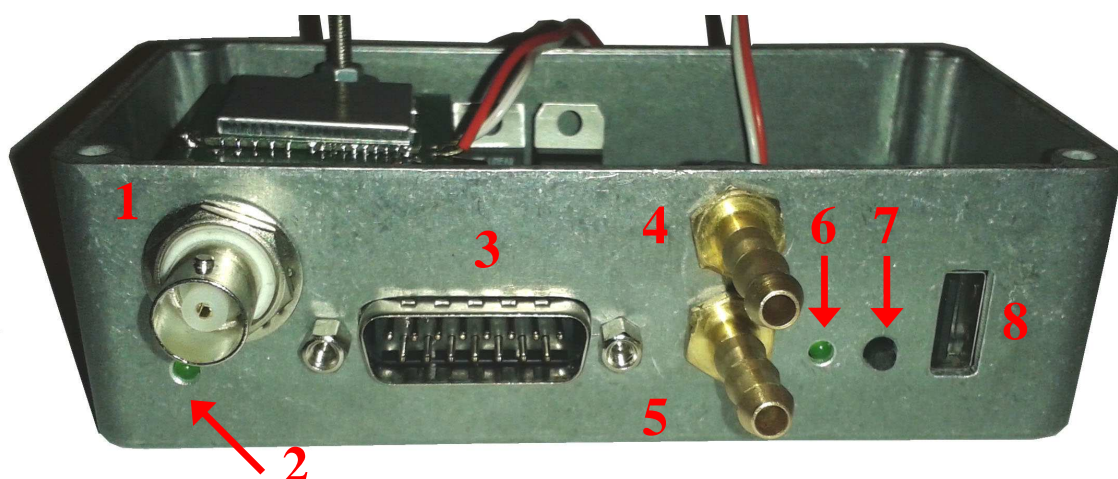
3.15 Strojní zpracování

Při návrhu zařízení bylo nutné brát v úvahu požadavek na velikost a váhu výsledného zařízení. Dále byla požadována základní mechanická odolnost. Po průzkumu možností na trhu jsem zjistil, že těmto požadavkům nejlépe vyhovuje krabička z hliníkové slitiny. Vybrána byla krabička s upevňovacími úchyty výrobce HAMMOND s označením 1590N1FL. Krabička je tvořena dvěma díly a její rozměry jsou 66x121x35 mm.

Dále bylo nutné rozmístit vstupně-výstupní konektory a ovládací prvky. Na obrázku 3.21 je vidět finální rozložení součástí čelního panelu.

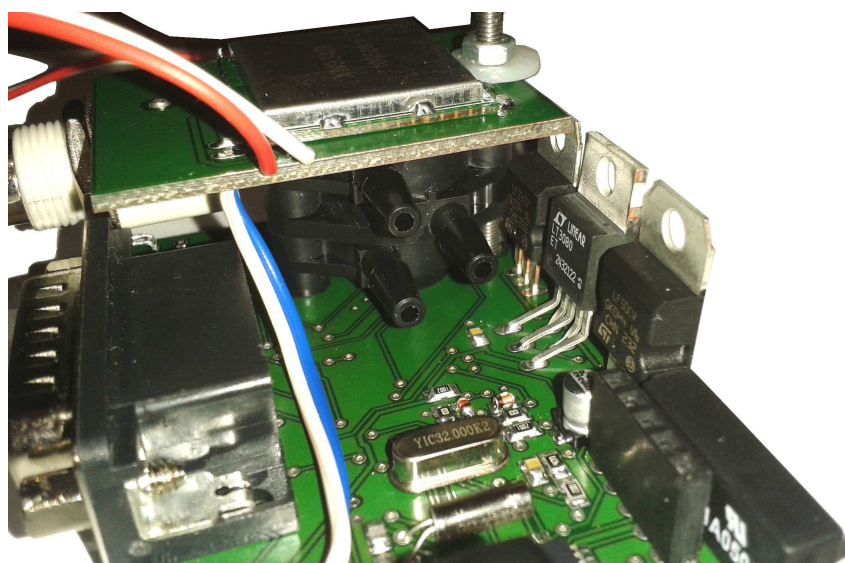
Popis jednotlivých částí:

- 1 – konektor pro připojení antény
- 2 – stavová LED zapisovače
- 3 – konektor pro připojení napájení a periferií typu CANNON 15pin
- 4 – vstup statického tlaku
- 5 – vstup celkového tlaku
- 6 – stavová LED pro práci s USB disky
- 7 – ovládací tlačítko pro kopírování disků
- 8 – USB konektor pro připojení USB disku



Obrázek 3.21 Rozložení čelního panelu.

Pro připojení portů tlakových čidel (Obrázek 3.22) na pitot-statický systém letadla bylo nutné vyrobit průchodky přes stěnu krabičky a přípojné porty tak, aby odpovídaly běžně používaným portům v letectví. Pro tento účel byly vyrobeny průchodky uvedené na obrázku 3.23.



Obrázek 3.22 Umístění a porty tlakových čidel.

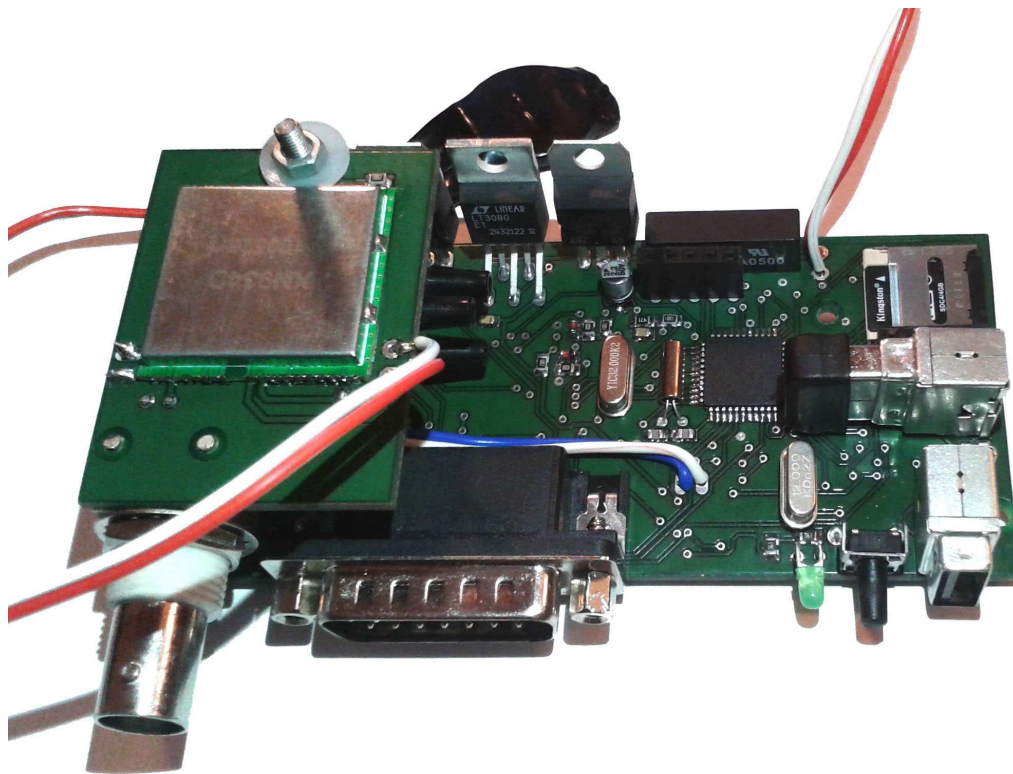


Obrázek 3.23 Průchodky a přípojovací porty tlaků.

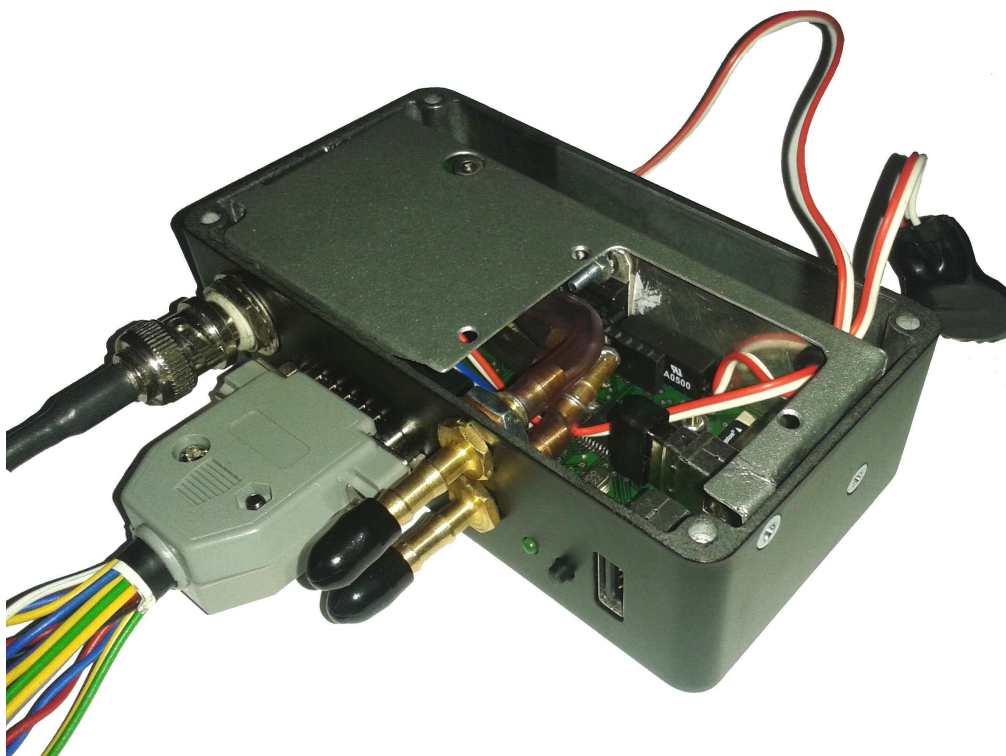
3.16 Finální výrobek

Na obrázku 3.24 je zobrazena kompletní sestava před zabudováním do krabičky. Obrázek 3.25 nám ukazuje již sestavený výrobek. Na tomto obrázku je také vidět oddělení prostoru hliníkovým plechem, který slouží i jako chladič pro stabilizátory napětí. Tento předěl je zde i pro zabezpečení neoprávněné manipulace s částmi zařízení během výměny záložní baterie, kterou si zákazník bude provádět sám.

Obrázek 3.26 nám pak ukazuje finální produkt. Krabička byla nastříkána černou matnou barvou běžně používanou na přístroje v letectví.



Obrázek 3.24 Sestava před zabudováním do krabičky.



Obrázek 3.25 Pohled při otevřeném krytu.

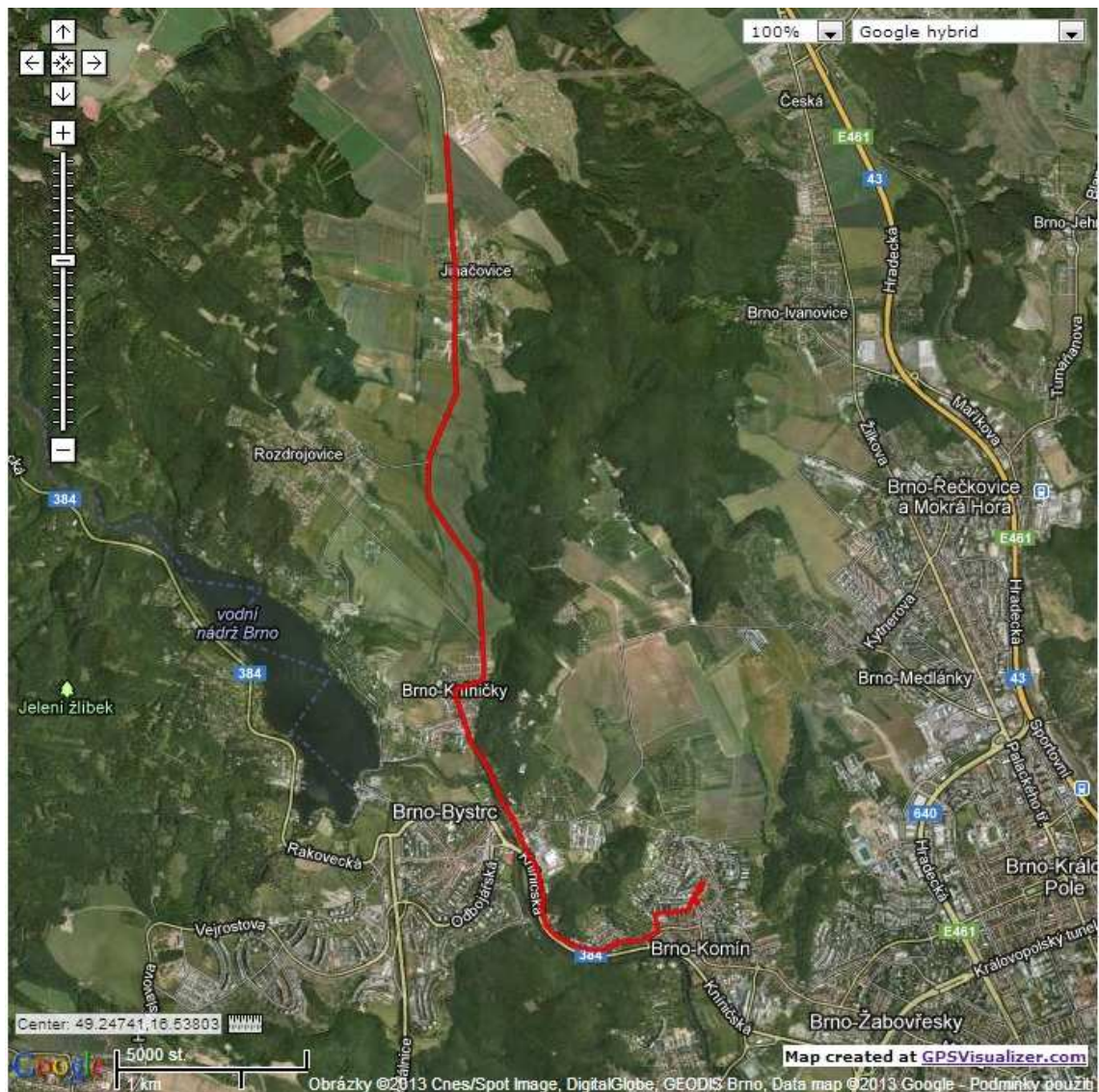


Obrázek 3.26 Finální výrobek.

3.17 Testování a měření

Celé zařízení je funkční a bylo otestováno pomocí dostupných prostředků. Nebyl proveden test měření otáček a teploty hlav motoru z důvodu nemožnosti připojení zařízení do letadla v době dokončení této práce. Nicméně ostatní funkce byly otestovány. Tlaková výška a rychlost byly otestovány pomocí připojení klasických přístrojů a zapisovače na jeden tlakový okruh a porovnáním hodnot na přístroji a hodnot zapisovače. Dále byla otestována funkčnost záznamu GPS dat pomocí jízdy v automobilu. Část této trasy je zobrazena na obrázku 3.27. Dále byla úspěšně vyzkoušena funkce kopírování vnitřních dat na připojený flashdisk.

Finální otestování výrobku za letu a ověření správnosti všech zapisovaných údajů je plánováno provést během letních měsíců, nicméně je možné říct, že zařízení je funkční.



Obrázek 3.27 GPS data. Vytvořeno využitím www.gpsvisualizer.com.

4 ZÁVĚR

V této práci jsou popsány principy měření letových dat a uvedeny příklady klasických přístrojů používaných v letectví. Dále jsou zde diskutovány jednotlivé požadavky na zapisovač letových dat.

Jako hlavní mikrokontrolér byl zvolen PIC 24FJ64GA004 z důvodu jeho dostatečné paměťové kapacity, výkonu a dostatečným počtem komunikačních rozhraní a použitých periférií. Dále je popsána obsluha jednotlivých částí zařízení, jako např. GPS modulu, tlakových čidel, akcelerometru.

Během vývoje zařízení se požadavky upravovaly a rozrůstaly od původního zadání např. o možnost data kopírovat na vyměnitelné médium. Tento problém je vyřešen pomocí USB host kontroléru Vinculum-II.

Výstupem této práce je funkční vzorek, který byl otestován za dostupných podmínek.

Hlavním přínosem této práce je vytvoření produktu, který na trhu chybí, a má tedy předpoklad úspěšného využití v praxi.

Lze tedy konstatovat, že práce splňuje předem kladené cíle, a stane se podkladem pro budoucí rozšíření zařízení, kde se předpokládá například možnost výstupu dat do zařízení s platformou Android.

5 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 2.1 Schéma uspořádání satelitů GPS[4].	10
Obrázek 2.2 Schéma Prandtlovy trubice. Převzato z [5].	12
Obrázek 2.3 Schéma a zobrazení klasického leteckého rychloměru. Převzato z [5].	13
Obrázek 2.4 Schéma a zobrazení klasického leteckého výškoměru. Převzato z [5].	15
Obrázek 2.5 Obálka obrátů. Převzato z [5].	16
Obrázek 2.6 Princip a zobrazení otáčkoměru. Převzato z [5].	17
Obrázek 2.7 Velikost a tvar impulsního výstupu motoru ROTAX 912. Převzato z [10].	18
Obrázek 3.1 Blokové schéma zapisovače letových údajů.	20
Obrázek 3.2 Základní blokové schéma architektury použitého mikrokontroléru. Převzato z [15].	21
Obrázek 3.3 Programátor a debugger mikroProg.	22
Obrázek 3.4 Základní schéma firmware mikrokontroléru.	23
Obrázek 3.5 Základní blokové schéma obvodu reálného času mikrokontroléru. Převzato z [14].	24
Obrázek 3.6 GPS anténa. Převzato z [20].	25
Obrázek 3.7 Datová úložiště mikro SD a USB disk použité při řešení.	28
Obrázek 3.8 Základní blokové schéma architektury Vinculum-II. Převzato z [16].	31
Obrázek 3.9 VNC2 Debug Module.	32
Obrázek 3.10 Průvodce novým projektem – okno ovladače a knihovny.	33
Obrázek 3.11 Průvodce novým projektem – okno nastavení pinů.	34
Obrázek 3.12 Vývojový diagram firmware pro Vinculum-II.	35
Obrázek 3.13 Tlakové čidlo MPX5010DP. Převzato z [20].	36
Obrázek 3.14 Tlakové čidlo MPX5100AP. Převzato z [20].	38
Obrázek 3.15 Schéma obvodu snímání otáček.	40
Obrázek 3.16 Senzor teploty hlav, jeho umístění (1); závislost odporu na teplotě (2). Převzato z [10].	41
Obrázek 3.17 Teplotní čidlo DS18B20. Převzato z [20].	42
Obrázek 3.18 Určení os akcelerometru vzhledem k letadlu.	43
Obrázek 3.19 Schéma napájení.	44
Obrázek 3.20 Akupack záložní baterie.	45
Obrázek 3.21 Rozložení čelního panelu.	46
Obrázek 3.22 Umístění a porty tlakových čidel.	46
Obrázek 3.23 Průchodky a připojovací porty tlaků.	47
Obrázek 3.24 Sestava před zabudováním do krabičky.	47
Obrázek 3.25 Pohled při otevřeném krytu.	48
Obrázek 3.26 Finální výrobek.	48
Obrázek 3.27 GPS data. Vytvořeno využitím www.gpsvisualizer.com .	49

6 POUŽITÉ ZKRATKY

AD	analogově digitální
ADC	analog to digital convertor, analogově digitální převodník
AGL	above ground level, výška nad terémem
AMSL	above mean sea level, nadmořská výška
ASCII	Standard Code for Information Interchange, Americký standardní kód pro výměnu informací
BCD	binary coded decimal, binárně kódované desítkové číslo
CR	carriage return, speciální znak ASCII
DC	direct current, stejnosměrný proud
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
FL	flight level, letová hladina
GGA	Global Positioning system Fix Data - data pozice GPS
GNSS	Global Navigation Satellite System, globální navigační satelitní systém
GPS	global positioning system, globální poziční systém
I2C	Inter-Integrated Circuit
IAS	indicated air speed, indikovaná rychlost
ICD	In-Circuit Debug, ladění v obvodu
ICSP	In-Circuit Serial Programming, seriové programování v obvodu
MCU	microcontroller unit, mikrokontrolér
MSA	mezinárodní standardní atmosféra
NMEA	National Marine Electronics Association
QNH	tlak vzduchu přepočtený na hladinu moře
RMC	Recommended Minimum Specific GNSS Data, Doporučené minimum specifických GNSS dat
RPM	rotate per minute, otáčky za minutu
RTCC	real time clock calendar, obvod reálného času
SPI	Serial Peripheral Interface, seriové rozhraní pro periferie
TAS	true air speed, pravá rychlost
UART	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter, univerzální asynchroní příjem/odesílání
ZLD	zapisovač letových dat

7 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] *European GNSS Agency* [online]. [cit. 2012-12-30]. Dostupné z: <http://www.gsa.europa.eu/>
- [2] *Information analytical centre of GLONASS and GPS controlling* [online]. [cit. 2012-12-30]. Dostupné z: <http://www.glonass-ianc.rsa.ru/en/>
- [3] *BeiDou Navigation Satellite System* [online]. [cit. 2012-12-30]. Dostupné z: <http://en.beidou.gov.cn>
- [4] *Official U.S. Government information about the Global Positioning System (GPS) and related topics* [online]. [cit. 2012-12-30]. Dostupné z: <http://www.gps.gov/>
- [5] *Učebnice pilota: pro žáky a piloty všech druhů letounů a sportovních létajících zařízení, provozujících létání jako svou zájmovou činnost*. 1. vyd. Cheb: Svět křídel, 2003. ISBN 80-852-8089-2.
- [6] *NMEA* [online]. [cit. 2012-12-30]. Dostupné z: http://www.nmea.org/content/nmea_standards/nmea_0183_v_410.asp
- [7] *Hope Microelectronics co., Ltd* [online]. [cit. 2012-12-30]. Dostupné z: <http://www.hoperf.com/>
- [8] RAPANT, Petr. *Družicové polohové systémy*. Vyd. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2002, 197 s. ISBN 80-248-0124-8.
- [9] Česká republika. **LETECKÝ PŘEDPIS L 5: PŘEDPIS PRO POUŽÍVÁNÍ MĚŘICÍCH JEDNOTEK V LETOVÉM A POZEMNÍM PROVOZU**.
In: <http://lis.rlp.cz/predpisy/predpisy/index.htm>. Uveřejněno pod číslem jednacím: 542/2010-220-SP/5.
- [10] ROTAX AIRCRAFT ENGINES. *Installation Manual ROTAX 912 Series: IM-912*. 898643. vyd. 2.0, 01.09.2012. Dostupné z: <http://www.flyrotax.com/>
- [11] *TL-elektronik - Products* [online]. [cit. 2013-01-16]. Dostupné z: <http://www2.tl-elektronik.cz/>
- [12] *Dynon Avionics - SkyView Intro* [online]. [cit. 2013-01-16]. Dostupné z: <http://www.dynonavionics.com>
- [13] Vyhláška 108/1997 Sb. Ministerstva dopravy a spojů, ve znění pozdějších předpisů.
- [14] *PIC24FJ64GA004 Family Data Sheet* [online]. 2010 [cit. 2013-04-19]. rev. D. ISBN 978-1-60932-022-5. Dostupné z: www.microchip.com
- [15] Microchip Technology Inc. [online]. [cit. 2013-05-06]. Dostupné z: www.microchip.com
- [16] *Vinculum-II Embedded Dual USB Host Controller IC Datasheet* [online]. 2012 [cit. 2013-04-19]. FT_000138. Dostupné z: www.ftdichip.com
- [17] HYDE, John. *USB Design By Example* [online]. 2010 [cit. 2013-04-19]. Revision 2.0. Dostupné z: www.ftdichip.com
- [18] *GPS04 datasheet* [online]. [cit. 2013-04-19]. Dostupné z: <http://www.hoperf.com>
- [19] FREESCALE SEMICONDUCTOR. *MPX5010 Data Sheet: Technical Data* [online]. 2012 [cit. 2013-04-19]. Rev 13, 10/2012. Dostupné z: <http://www.freescale.com/>

- [20] TME Czech Republic s.r.o. - Elektronické součástky [online]. 2013 [cit. 2013-04-19]. Dostupné z: <http://www.tme.eu/cz/>
- [21] MICROCHIP TECHNOLOGY INC. *MCP3221 Datasheet* [online]. 2006 [cit. 2013-04-19]. Revision C (July 2006). Dostupné z: www.microchip.com
- [22] FREESCALE SEMICONDUCTOR. *MPX5100 Data Sheet: Technical Data* [online]. 2010 [cit. 2013-04-19]. Rev 13, 05/2010. Dostupné z: <http://www.freescale.com/>
- [23] Barometric formula. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2013 [cit. 2013-04-19]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Barometric_formula
- [24] MAXIM INTEGRATED. *DS18B20 datasheet* [online]. 2008 [cit. 2013-04-19]. REV: 042208. Dostupné z: www.maximintegrated.com
- [25] FREESCALE SEMICONDUCTOR. *MMA7455L Technical Data* [online]. 2009 [cit. 2013-04-19]. Rev 10, 12/2009. Dostupné z: <http://www.freescale.com/>