



Fakulta elektrotechnická
Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Autonomní létající prostředek

Autor práce: Bc. Petr Hodina
Vedoucí práce: Ing. Petr Weissar, Ph.D.

Plzeň 2016

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Petr HODINA**
Osobní číslo: **E13N0103P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektronika a aplikovaná informatika**
Název tématu: **Autonomní létající prostředek**
Zadávací katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Navrhňte a realizujte létající prostředek typu delta-křídlo a vybavte jej vhodnou elektronikou.

1. Ověřte řízení modelářskými prostředky.
2. Umožněte autonomní i manuální ovládání.
3. Zvolte vhodné přenosové technologie.
4. Diskutujte možnosti zvoleného řešení.

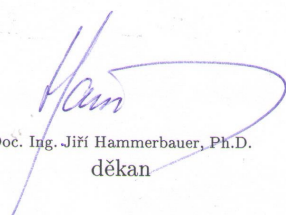


Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:

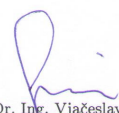
Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Weissar, Ph.D.**
Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2015**
Termín odevzdání diplomové práce: **16. května 2016**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá projektem autonomního létajícího prostředku. Jejím úkolem je navrhnout a sestavit létající prostředek typu delta-křídlo. Poté jej vybavit elektronikou, která umožní manuální ovládání. Dále rozšířit stávající hardwarovou konfiguraci o senzory a telemetrii, která umožní modelu autonomní let s možností sledování parametrů letu.

V práci je tedy nutné nejdříve prozkoumat delta-křídlo po konstrukční stránce, dále navrhnout vhodný hardware pro delta-křídlo a pilota, který umožní manuální i autonomní let. Samotné řešení je popsáno blokovým schématem, jehož bloky jsou podrobně popsány v jednotlivých kapitolách. Práce dále pojednává o softwarové stránce.

Pro univerzálnost řešení je využito stávajícího řešení autopilota - Paparazzi UAV.

Klíčová slova

autonomní létající prostředek, delta-křídlo, Paparazzi UAV, řízení, telemetrie, ARM, STM32, FOC

Abstract

Hodina, Petr. *Autonomous flying object* [*Autonomní létající prostředek*]. Pilsen, 2016. Master thesis (in Czech). University of West Bohemia. Faculty of Electrical Engineering. Department of Applied Electronics and Telecommunications. Supervisor: Petr Weissar

The goal of this thesis is to design autonomous flying object. The agreed type is delta-wing. There should be two modes. One for manual control and the other for autonomous. For the autonomous flight the delta wing is equipped with sensors and telemetry modules. As the first step it is important to evaluate the construction side of the delta-wing and select the appropriate hardware which will allow manual or autonomous flight. The designed solution is described by block schematics with description of each block following in separate section of the thesis. Further there is overview of the software solution. Paparazzi UAV has been chosen as an already proven solution for the autopilot.

Keywords

autonomous flying object, delta-wing, Paparazzi UAV, control, telemetry, ARM, STM32, FOC

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem svou závěrečnou práci 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 závěrečné 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 § 270 trestního zákona č. 40/2009 Sb.

Také prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

V Plzni dne 16. května 2016

Bc. Petr Hodina

.....

Podpis

Obsah

Seznam obrázků	v
Seznam tabulek	vi
Seznam symbolů a zkratk	vii
1 Úvod	1
2 Delta křídlo	3
2.1 Konstrukce	3
2.2 Serva	4
2.3 BLDC motor	6
2.4 Elektronický regulátor otáček	8
2.5 Akumulátor	8
2.6 Vysílače	9
2.7 Přijímače	9
2.7.1 PWM	10
2.7.2 PPM	10
2.7.3 PCM	11
2.7.4 S.Bus	11
2.7.5 DSM2/DSMX	11
3 Autonomní ovládání	13
3.1 Mikrokontrolér	14
3.1.1 Programovací rozhraní	14
3.1.2 Vývojová prostředí	15
3.1.3 Knihovna libopencm3	15
3.1.4 Příjem z vysílače	15
3.1.5 Ovládání serva	15
3.2 Napěťové úrovně	17
3.3 Akcelerometr a gyroskop	17
3.3.1 Parametry	17
3.3.2 Blokové schéma	17

3.3.3	Schéma zapojení	19
3.4	Magnetometr	19
3.4.1	Parametry	19
3.4.2	Blokové schéma	20
3.4.3	Schéma zapojení	20
3.5	Sensor fusion	21
3.6	Barometr	21
3.6.1	Parametry	22
3.6.2	Blokové schéma a schéma zapojení	22
3.7	Senzor rychlosti	23
3.8	Možnosti a typy lokalizací	23
3.8.1	Výběr GPS a GSM/GPRS modulu	24
3.8.2	Schéma zapojení	24
3.8.3	NMEA formát	24
3.9	Regulátor	25
3.10	Autopilot	25
3.10.1	Ardupilot	25
3.10.2	Paparazzi UAV	25
3.11	Ukládání dat	26
3.11.1	Souborový systém	26
3.11.2	FAT16	26
4	Telemetrické systémy	28
4.1	XBee	28
4.2	3DR radio	29
4.3	SIM908	29
4.4	LoRa	31
4.5	FPV	32
5	Závěr	33
	Reference, použitá literatura	35

Seznam obrázků

2.1	Blokové schéma hardware delta-křídla	3
2.2	Tvar delta-křídla	4
2.3	Průřez servem Převzato z [3] 	5
2.4	Motor nalevo je typu inrunner. Motor v pravo typu outrunner. Převzato z [4] 	6
2.5	Průběh PPM modulovaného signálu a dekodování jednotlivých PWM pluzů. Převzato z ppm 	10
2.6	Inverze S.BUS signálu na UART signál	11
3.1	Blokové schéma delta-křídla s hardware pro autonomní let	13
3.2	Vývojový diagram dekodování PPM nebo S.BUS	16
3.3	Definice rozložení os senzoru MPU6050 Převzato z [7] 	18
3.4	Blokové schéma senzoru MPU6050 Převzato z [7] 	18
3.5	Schéma zapojení senzoru MPU6050 Převzato z [7] 	19
3.6	Definice rozložení os MAG3110 Převzato z [8] 	20
3.7	Blokové schéma senzoru MAG3110 Převzato z [8] 	20
3.8	Schéma zapojení senzoru MAG3110 Převzato z [8] 	21
3.9	Blokové schéma pro sensor fusion Převzato z [9] 	22
3.10	Blokové schéma a schéma zapojení senzoru BMP180 Převzato z [10] . . .	23

Seznam tabulek

2.1	Přehled parametrů RC vysílačů.	10
3.1	Parametry mikrokontroléru STM32F4	14
4.1	Přehled jednotlivých XBee modelů a jejich parametrů	28

Seznam symbolů a zkratek

PWM	P ulse- W idth M odulation. Pulzně délková modulace.
PPM	P ulse- P osition M odulation. Pulzně polohová modulace.
PCM	P ulse- C ode M odulation. Pulzně kódová modulace.
ESC	E lectronic S peed C ontrol. Elektronický regulátor motoru.
BLDC	B rushless D C motor. Bezkartáčový DC motor.
GPS	G lobal P ositioning S ystem, česky Globální polohovací systém
GSM	G roupe S pécial M obile. Globální Systém pro Mobilní komuni- kaci.
GPRS	G eneral P acket R adio S ervice. GSM přenos dat a připojení k Internetu
RPM	R evolutions p er m inute. Otáčky za minutu
BEC	B attery E liminating C ircuit. Integrovaný regulátor napětí
DMP	D igital M otion P rocessor. Digitální procesor zpracovávající po- hyb
LSB	L east S ignificant B it. Nejméně významný bit
IMU	I nternal M easurement U nit. Inerciální navigační jednotka
UART	U niversal A synchronous R eceiver/ T ransmitter
I2C	I nter- I ntegrated C ircuit
ADC	A nalog to D igital C onverter
GPIO	G eneral P urpose I nput/ O utput

Kapitola 1

Úvod

Tématem diplomové práce je projekt autonomního létajícího prostředku. Pod pojmem létající prostředek se obecně rozumí systém schopný letu. Pojem autonomní lze interpretovat jako schopný orientovat se v prostředí pomocí sensorů osazených na prostředku a letět dle zadaného letového plánu bez nutnosti zásahu operátora.

Pro tuto práci je jako platforma zvoleno delta-křídlo (o hmotnosti přibližně 760 g a rozpětí křídel 120 cm). Účelem platformy je představit funkční řešení schopné manuálního letu, kdy je platforma řízena pilotem ze země pomocí RC soupravy, a autonomního letu, za který se považuje let dle zadaného letového plánu bez nutnosti zásahu pilota. Ten může být zadán před startem či později během letu pozměněn.

Předností popisovaného systému je modularita, která je zajištěna vhodně zvoleným hardware a software a nabízí prostor pro rozšíření navazujících projektů.

Tématem úvodní kapitoly této práce je popis nezbytného hardware. Celá platforma je nejdříve zobrazena jako funkční celek v blokovém diagramu. Tento diagram obsahuje pouze bloky nezbytné pro manuální řízení. Tyto bloky jsou následně rozebrány v jednotlivých sekcích.

Druhá kapitola opět popisuje realizovanou platformu, a to opět pomocí blokového diagramu, tentokrát ale doplněného o bloky nutné pro autonomní let. Srdcem této platformy je řídicí 32-bitový mikrokontrolér STM32F4 založený na architektuře ARM. K tomuto mikrokontroléru je připojena většina nových bloků - senzory, telemetrické moduly... Po rozboru přidaných jednotlivých bloků následuje část s popisem firmware pro tento mikrokontrolér - autopilot. Úkolem tohoto firmware je především sběr dat ze sensorů, jejich zpracování a použití k řízení letu. Dále se stará o zpracování řídicích signálů vysílaných pilotem ze země v případě, že je režim přepnut do manuálního ovládání a vysílání telemetrických informací o letu. Dále je zde popsáno rozhraní pro PC pro nahrání firmware do delta-křídla a pro naplánování letového plánu.

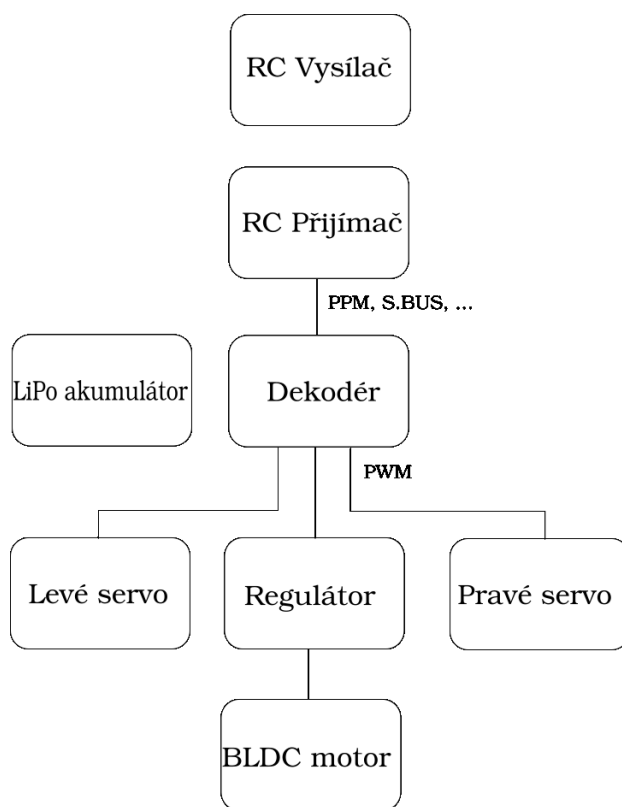
K tomuto mikrokontroléru je připojen přes UART další mikrokontrolér. Tím je STM32F1, který se stará o řízení 3 fázového motoru typu BLDC pomocí periferie časovače. Tento blok nahrazuje v původním modelu blok regulátoru motoru z důvodu větší kontroly nad motorem. Pro řízení motoru je využit firmware FOC od společnosti ST Microelectronics.

Celá platforma je napájena ze 2 akumulátorů typu LiPo pro omezení vlivu rušení na napájení. Poslední kapitola této práce pojednává o dostupných telemetrických modulech. Příslušné katalogové listy a zdrojové kódy jsou obsaženy také na přiloženém CD. Poznatky v první kapitole o RC technice jsou především z těchto zdrojů [1] a [2].

Kapitola 2

Delta křídlo

Na uvedeném blokovém schématu lze vidět bloky, které jsou nezbytné pro manuální ovládání delta-křídla. Jednotlivé bloky jsou dále detailněji rozebrány.



Obrázek 2.1: Blokové schéma hardware delta-křídla

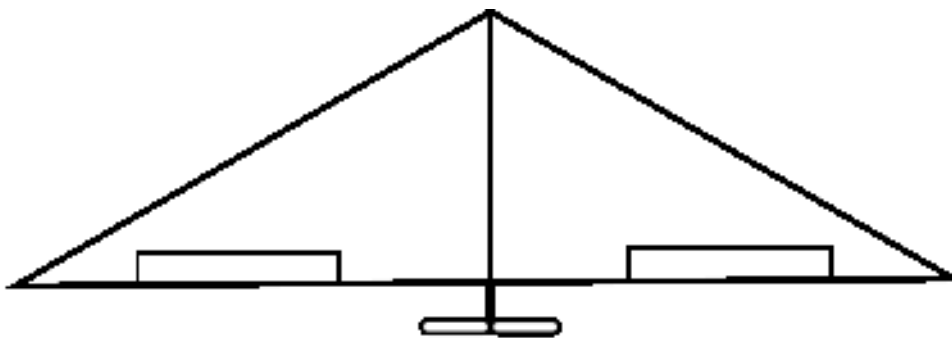
2.1 Konstrukce

Pod pojmem delta-křídlo lze označit jakýkoliv létající prostředek, který svým tvarem připomíná písmeno V či trojúhelník. Rozpětí delta-křídla určuje ovladatelnost, rychlost a další letové parametry. Pro účely této práce bylo zvoleno rozpětí křídel 120 cm, které by

mělo usnadnit let jak pilotovi, tak i autopilotovi.

Běžně používaným materiálem pro stavbu delta-křídla je EPP. Jedná se o extrudovaný polypropylen, který je dostatečně odolný a zároveň velmi lehký. Jako alternativní materiál může posloužit polystyrén - extrudovaný (XPS) či expandovaný (EPS) - , Elapor nebo Depron. Samotný povrch materiálu se ještě často upravuje, aby byl hladký. Tato jednoduchá úprava umožňuje delta-křídlu dosáhnout vyšší letové rychlosti.

Ačkoliv je tělo delta-křídla z poměrně odolného materiálu, často se ještě dovnitř umísťuje výztuž. Sestavovaný model delta-křídla se skládá ze dvou kusů EPP křídel. Proto jsem umístil do těla uhlíkovou tyčku, která obě křídla spojuje. Samotná křídla jsou k sobě přilepená lepidlem. Profil křídel je tvarován tak, aby způsobil vznik vztlakové síly pod křídlem, která působí proti směru gravitační síly. Pro účel letu je nutné delta-křídlo vy-



Obrázek 2.2: Tvar delta-křídla

bavit jedním či více motory. Ty mohou být umístěny na přední straně křídla či na zadní. Pro účel práce jsem se rozhodl vybavit delta-křídlo jen jedním motorem. Ten jsem umístil na zadní stranu křídla, která je více chráněna a tím je i méně namáhána vrtule na rotoru motoru.

Pro vychýlení delta-křídla slouží elevony. Ty jsou umístěny na obou zadních stranách. Jedná se o mix výškovek a křidélek, které lze najít na klasickém modelu letadla. Jejich nakloněním lze dosáhnout změnu směru letu. Lze tak letadlem zatáčet do stran, klesat a stoupat. Pro naklápění elevonů je třeba delta-křídlo vybavit servy a následně je navzájem spojit pomocí táhel.

2.2 Serva

Servo se skládá z několika mechanických a elektrických částí. Převody jsou sady ozubených kol, které slouží pro převod síly. Jsou obvykle vyrobeny z plastu. Pro náročné aplikace se používají kovová ozubená kola. Na výstupní hřídel serva a převody mohou během provozu

působit velké síly a stranové zatížení. Je nutné zajistit, aby se výstupní hřídel moc nepohybovala do stran, ale pouze otáčela kolem své osy. Proto se serva, u kterých se očekává větší zatížení, osazují kuličkovými ložisky, která výrazně eliminují tření, opotřebení ale i různé vůle mezi hřídelí a jejím uložením.

Nejčastějším typem motoru používaným v servu je stejnosměrný motor. Výhodou těchto



Obrázek 2.3: Průřez servem | Převzato z [3]

motorů je jejich nízká cena a vysoká odolnost, avšak při změně výchylky serva reagují na změnu pomaleji. Tuto nevýhodu odstraňují serva se střídavým motorem, která jsou navržena pro dodání vysokého točivého momentu. Oproti stejnosměrným motorům nemají žádné kartáče, které by přepínaly vinutí a tím se opotřebovávaly. Jejich regulátor je však velmi složitý a tím pádem jsou tato serva i velmi drahá.

Každé servo je na vstupu vybaveno elektronikou, která zpracovává vstupní signál s informací o požadované výchylce, dle kterého nastavuje patřičnou výchylku. Dle druhu vstupního signálu lze serva rozdělit na analogové a digitální. Oba typy mají své výhody i nevýhody.

Analogová serva typicky očekávají na svém vstupu řídicí signál v podobě pulzu v délce jedné do dvou milisekund. Doba trvání tohoto signálu je úměrná výchylce serva. Uvedené krajní délky pulzu korespondují s krajními výchylkami serva. Střed je při délce signálu přibližně 1,5ms. Frekvence těchto pulzů je 50Hz. Servo při příjmu pulzu porovná, zda

výchylka odpovídá délce přijatého impulsu. Je-li mezi výchylkou a pulzem rozdíl, pak zesilovač pošle krátký pulz do motoru serva a nastaví požadovanou výchylku, tudíž motor serva je v provozu pouze po krátkou dobu - po příchodu pulzu. Nevyužije se tedy plně kroutící moment motoru. Zároveň servo nedosahuje plné rychlosti pohybu. Dalším problémem je, že točivý moment (a od něj odvozená síla serva) rapidně klesá s klesající vzdáleností, o kterou se má páka přesunout. Dále je-li vzdálenost mezi stávající a požadovanou výchylkou dostatečně malá, točivý moment nemusí stačit k tomu, aby požadovanou výchylku skutečně nastavil - motor se nestihne roztočit.

Mnohé z těchto problémů řeší digitální serva, která si pamatují poslední přijatou výchylku a řídí motor i v době, kdy žádný signál na vstup nepřichází. Výsledkem je silnější a přesnější servo, které lze ještě dále doprogramovat. Lze tedy specifikovat nastavení rychlosti serva, pásma nečinnosti, maximální výchylky, směr serva, ... Pro určení momentální výchylky je v servu implementována zpětná vazba použitím potenciometru, jež je připevněn k výstupní hřídeli.

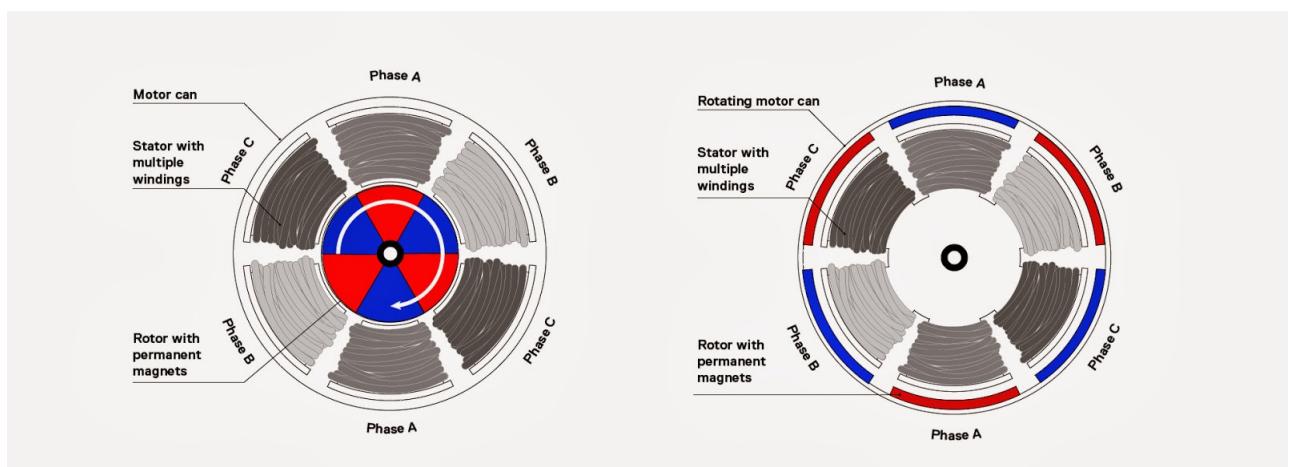
Typickými parametry pro serva jsou rychlost $[s/^\circ]$ a síla (moment) $[kg \cdot cm]$. Většina serv pracuje na napájecím napětí 5V.

2.3 BLDC motor

Stejnoseměrný motor s elektronickou komutací je aktuátorem delta-křídla. K jeho hřídeli je připevněna vrtule, která rotačním pohybem kolem hřídele generuje tah nezbytný pro let.

Samotný BLDC motor se skládá z magnetů, které jsou umístěny na rotoru a vinutí, jež je součástí statoru. Pro řízení motoru je nezbytný regulátor, který generuje pro každou ze 3 fází motoru řídicí pulzy.

Motor lze dále z konstrukčního hlediska rozdělit na tzv. inrunner a outrunner. Pro letadla,



Obrázek 2.4: Motor nalevo je typu inrunner. Motor v pravo typu outrunner. | Převzato z [4]

helikoptéry a multikoptéry se používá především outrunner. V této konfiguraci je rotor

umístěn na vnější části motoru. Vnitřek motoru tvoří stator. Naopak motor typu inrunner má rotor umístěn uvnitř a stator kolem. Tento typ dosahuje vyšších úhlových rychlostí než typ outrunner, avšak nedosahuje tak vysokých hodnot točivého momentu, který má význam zejména při otáčení velkých vrtulí.

Výrobci typicky umísťují parametry motoru do jeho jména. Zde je příklad:

2212Q850KV12N14P

- První dvojčíslí udává typicky průměr motoru či rotoru
- Druhé dvojčíslí udává typicky výšku motoru či rotoru
- Hodnota před znaky KV udává počet otáček na jeden Volt
- Následující dvojčíslí udává počet elektromagnetů na statoru.
- Poslední dvojčíslí udává počet permanentních magnetů na rotoru.

Důležitým parametrem pro BLDC motor je hodnota kV, která udává poměr mezi točením motoru a přivedeným napětím, za předpokladu že motor není zatížen. Otáčky motoru se udávají v jednotkách rpm, tedy počet otáček za minutu. Pro výpočet maximálních otáček stačí vynásobit tento parametr motoru s přivedeným napětím.

Dalším důležitým parametrem je počet permanentních magnetů na rotoru a elektromagnetů na statoru. Čím vyšší je jejich počet, tím více točivého momentu generují.

Pro délku letu je velmi důležitým parametrem efektivita motoru. Pro výpočet výkonu lze použít následující vzorec:

$$P_{in} = U \times I$$

Kde P_{in} je příkon motoru, U je přivedené napětí a I je přivedený proud do motoru. Přenesený výkon na výstupu P_{out} je však zmenšen o ztráty motoru P_{ztr} , tedy:

$$P_{out} = P_{in} - P_{ztr}$$

Tyto ztráty jsou způsobeny ztrátami v mědi a v železe. K výpočtu ztrát v mědi je nutné znát odpor vinutí motoru, který lze získat měřením odporu na svorkách motoru a následném vydělení, jelikož jsme měřili odpor vinutí 2 cívek.

$$P_{med} = I^2 \times R_{vinuti}$$

Ztráty v železe jsou způsobeny fluktuací magnetického pole uvnitř motoru. Pro výpočet potřebujeme znát velikost proudu nezbytného pro otáčení motoru bez připojené zátěže - I_0 .

$$P_{zel} = U \times I_0$$

Efektivitu motoru lze vypočíst z tohoto vztahu:

$$Ef = \frac{P_{out} - P_{ztr}}{P_{in}} = \frac{U \times I - (I^2 * R_{vinuti} + U \times I_0)}{U \times I}$$

2.4 Elektronický regulátor otáček

Tento modul slouží k ovládání otáček střídavého motoru. Pro řízení otáček je regulátor vybaven vstupem, na kterém očekává stejný signál jako pro řízení serva. Elektronika tento signál vyhodnotí a náležitě sepne výkonový stupeň. Ten je tvořen výkonovými tranzistory typu MOSFET s malým vnitřním odporem v sepnutém stavu a rychlým spínáním.

Regulátor může být vybaven dalšími obvody. Především se jedná o stabilizátor napájení (BEC), který je typicky využit pro napájení serv a přijímače bez nutnosti diskretního stabilizátoru. Nevýhodami jsou pevné výstupní napětí stabilizátoru a efektivita. Regulátor může být dále vybaven ochrannými obvody proti proudovému a tepelnému přetížení, vstupem pro brzdu (Brake) - té je využito pro sklopení listů vrtule - a obvodem, jež odpojí motor při poklesu napájecího napětí. Důvodem je předejít nebezpečí hlubokého vybití akumulátorů, pokud používáme sady s větším počtem článků. Po odpojení motoru zůstává zachováno napájení přijímače a serv obvodem BEC ještě po určitou dobu pro bezpečné přistání.

Funkcí regulátoru je řídit střídavý motor impulzy s frekvencí řádu několika kilohertzů. Detailnější popis řízení těchto typů motorů je uveden v kapitole.

Regulátory označené OPTO mají elektricky zcela oddělenou část řídicí elektroniky a výkonový stupeň ovládající motor. Účelem je omezit šíření rušivých napětí při spínání velkých proudů při větších napětích. U těchto regulátorů tedy nenajdeme obvod BEC, pro napájení přijímače a serv je nutné použít sekundární akumulátor.

2.5 Akumulátor

Použitým typem akumulátoru pro delta-křídlo byl zvolena technologie LiPo (Lithium Polymer), která v porovnání s ostatními typy má velmi vysokou hustotu energie při stejné hmotnosti akumulátoru.

Kromě zmíněného akumulátoru typu LiPo lze použít i např. nikl-kadmiové (NiCad) či nikl-metal hydridové (NiMH). Tyto typy se používaly v RC technice dříve, avšak dnes se nahrazují dostupnými LiPo akumulátory z důvodu hmotnosti a hustoty energie.

Akumulátory LiPo se skládají z jednotlivých článků. Nominální napětí článku je 3.6V. Spojením více těchto článků dohromady v sérii, lze získat vyšší napětí např. spojením 2 článků získáme napětí akumulátoru 7.2V, 11.1 pro 3 články, ... Paralelním zapojením článků lze dosáhnout zvýšení kapacity. Zapojení 3S2P značí 3 články zapojené v sérii a paralelně k dalším 3 článkům zapojeným v sérii.

V průběhu provozu napětí na akumulátoru klesá. Je nezbytné periodicky hodnotu napětí na článku monitorovat, aby nekleslo pod hodnotu 3.0V. Obdobně při nabíjení článku je nezbytné nepřekročit hodnotu článku 4.2V.

Kapacita akumulátoru reprezentuje dobu, po kterou je schopen akumulátor dodávat energii, vyjádřenou v mA.H. Vyšší hodnota kapacity znamená delší dobu letu, nicméně zároveň

také vyšší hmotnost. Důležitým parametrem akumulátoru je kontinuální vybíjecí proud označovaný jako C, který vyjadřuje maximální kontinuální odebíraný proud z baterie. Pokud je tato hodnota překročena, může dojít k nevratnému poškození baterie. Pro výpočet kontinuálního maximálního odebíraného proudu lze použít následující vztah:

$$I_{out} = C \times Kapacitabaterie[A]$$

Někteří výrobci LiPo akumulátorů poskytují ve svých katalogových listech i hodnotu burst C, která odpovídá největšímu možnému odebíranému proudu po dobu krátkého intervalu, typicky 15-30 sekund. Pro výpočet Wh lze uplatnit následující vztah:

$$Energie = pocetclankux3.6VxKapacitabaterie[Wh]$$

Z tohoto vztahu si lze spočítat maximální teoretickou dobu letu při znalosti výkonu motoru a jednotlivých komponent na modelu.

2.6 Vysílače

Jedná se o součást RC soupravy. Pilotovi slouží k ovládní delta-křídla. Hlavními parametry vysílače jsou počet kanálů a vysílací frekvence. V ČR jsou pro modelářské použití povoleny frekvence 27MHz, 35MHz, 40MHz a 2,4GHz. Pro letecké modely se používají především pákové vysílače. Volantové slouží k ovládní lodí či aut.

Pro ovládní delta-křídla jsou nezbytné knipty - proporcionální. U čtyř a vícekanalových jsou knipty dva a jsou oba dvouosé. Podle rozložení funkcí se rozlišují různé módy vysílačů. Ke každé ose knipty je buď pod ní, nebo vedle umístěn trimer, který slouží k přesnému nastavení nulové polohy kanálu. Nejedná se ale o hodnotu nulové výchylky páky na vysílači, ale o posun ovládané plochy na letadle.

Nezbytnou součástí vysílače je anténa, vypínač a baterie. Je nutné zmínit, že po zapnutí vysílá ovladač signál neustále.

Některé vysílače dále nabízejí tzv. simulátor. Jedná se o konektor pro připojení k počítači, na kterém lze spustit letecký simulátor a z vysílače letadlo v tomto programu ovládat.

Vysílač může dále obsahovat displej a různá tlačítka např. pro nastavení mixů. Mixováním je myšleno spřažení dvou a více kanálů a podobně. Lze tak například donutit křídélka aby se souhlasně vyklápěla dolů coby klapky. Tato vlastnost je nezbytná pro ovládní delta-křídla, které má pro změnu směru k dispozici jen elevony.

2.7 Přijímače

Výběr RC přijímače souvisí s vybraným vysílačem. Je nutné vybrat takový, který pracuje ve stejném pásmu. Dalším parametrem pro výběr je počet kanálů. Posledním parametrem je výstup na přijímači. Zde máme široký výběr: PWM, PPM, PCM, S.Bus, DSM2/DSMX...

	Turnigy 9X Pro	Spektrum DX9
Pásmo	2,4GHz	2,4GHz
Počet kanálů	9	9
Příjem telemetrie	Ano	Ano
Kódování	PPM, PCM	DSM2/DSMX

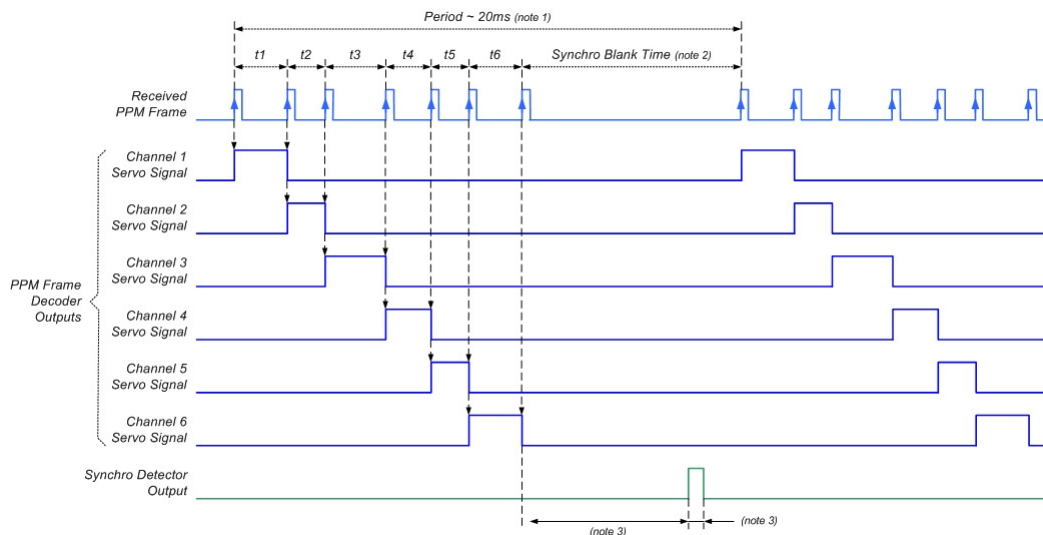
Tabulka 2.1: Přehled parametrů RC vysílačů.

2.7.1 PWM

V RC technice je nejběžnější rozsah intervalu, ve kterém se pohybuje impuls od 1ms do 2ms. Střední hodnota - nulová výchylna - je 1,5ms.

2.7.2 PPM

Jedná se o kódování, kdy je délka impulsu v čase konstantní a mění se jen samotná poloha impulsu v periodě. V RC technice je v signálu zakódována hodnota několika kanálů, které se přenášejí postupně po sobě. Celkem za sebou může být zakódováno až 8 kanálů. Perioda celého rámce se všemi signály pro jednotlivé kanály je zpravidla 22,5ms. Každý interval je zahájen synchronizačním impulsem opačné polarity o šířce cca 0,3ms, jehož trvání se odečítá od délky původního signálu PWM. Signály pro jednotlivé kanály na sebe bezprostředně navazují. Za posledním kanálem je vložen ukončovací impuls rámce o šířce 0,3ms a následuje interval bez synchronizačních impulsů.



Obrázek 2.5: Průběh PPM modulovaného signálu a dekódování jednotlivých PWM pluzů.
[Převzato z ppm]

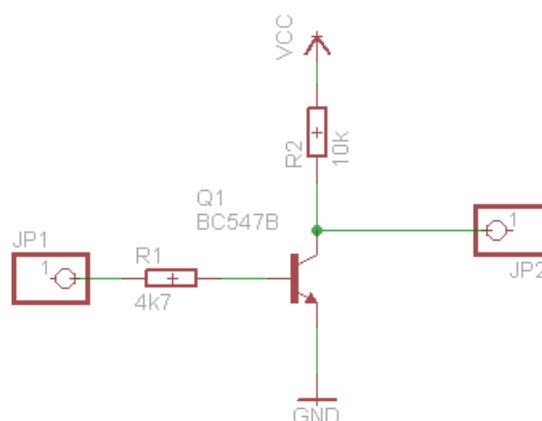
2.7.3 PCM

Pulzně kódová modulace je v principu podobná PPM, avšak data v signálu nejsou analogová, ale digitální. Oproti PPM poskytuje odolnost vůči chybám s možností následné korekce chyby. Konkrétní implementace závisí na výrobci.

2.7.4 S.Bus

Jedná se o digitální sériové rozhraní vyvinuté firmou Futuba, které umožňuje připojení až 16 serv a 2 digitálních vstupů. Pro rozvod signálu se používá jeden společný kabel. Ten může být propojen přes více serv. Ve vyslaném datovém rámci má každé servo zakódovaný údaj o výchylce, identifikovaný číslem kanálu. Z hlediska signálu se jedná o invertovaný UART s následujícími parametry.

Komunikační rychlost je 100000 Bd, formát zprávy je 1 start bit, 8 datových bitů, 1 paritní bit se sudou paritou a 2 stop bity. Pro dekodování dat tedy stačí signál invertovat. K tomuto účelu je deska osazena tranzistorem BC547B. Datový rámec zprávy má celkem



Obrázek 2.6: Inverze S.BUS signálu na UART signál

25 bytů. První byte je nazýván start byte s neměnnou hodnotou 0xF0. Po něm následuje 22 bytů s hodnotami pro jednotlivé kanály z celkových 16. Každý kanál má výchylku zakódovanou v 11 bitech. Předposlední byte slouží jako flag byte. První dva horní bity je možno využít jako digitální kanály. Poslední byte má napevno natavenou hodnotu 0x00. Výhodou tohoto rozhraní je snížení počtu kabelů na jediný. Nevýhodou je ale nutnost použití převodníku pro standardní serva a vyšší cena.

2.7.5 DSM2/DSMX

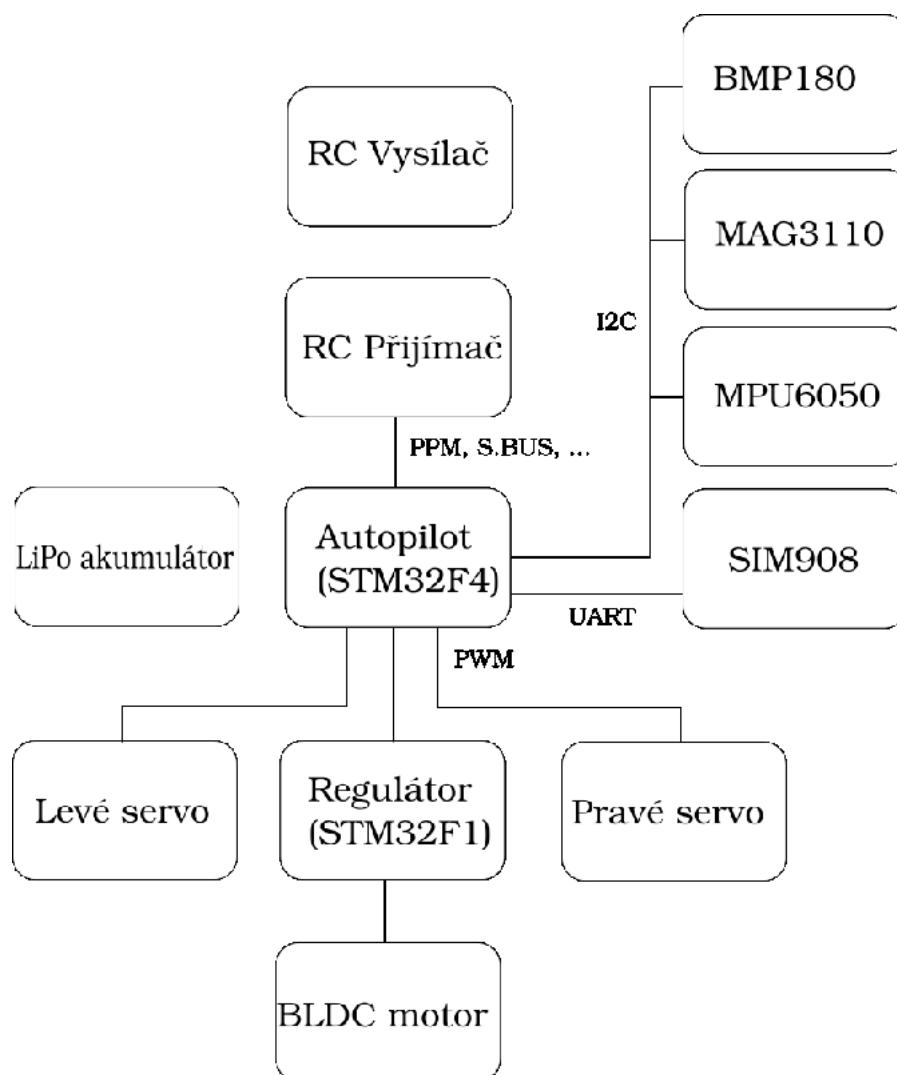
Opět se jedná o digitální sériové rozhraní, tentokrát vyvinuté firmou Spektrum. Parametry jsou následující. Komunikační rychlost 115200 Bd, 1 start bit, 8 datových bitů, bez

paritního bitu a 1 stop bit.

Kapitola 3

Autonomní ovládání

Tato kapitola přidává k již existujícímu hardware další bloky, které jsou potřebné pro autonomní ovládání. Jednotlivé bloky jsou opět podrobně popsány.



Obrázek 3.1: Blokové schéma delta-křídla s hardware pro autonomní let

3.1 Mikrokontrolér

Jedná se o mikrokontrolér, na kterém běží firmware autopilota. Pro účely této práce byl vybrán 32-bitový mikrokontrolér STM32f407 od firmy ST Microelectronics s architekturou ARM Cortex-M4.

Tento mikrokontrolér byl zvolen především z důvodu přítomnosti DSP instrukcí a FPU ko-procesoru, které urychlují část výpočtů prováděných autopilotem. Dále z důvodu velkého počtu periférií (USART, I2C, TIM, ADC, USB, SDIO), vysoké rychlosti systémových hodin. Pro uložení programu je k dispozici paměť typu FLASH o velikosti. Mikrokontrolér disponuje dále pamětí typu RAM pro data o celkové velikosti. Jako pouzdro bylo použito LQFP100 stm32f4. Mikrokontrolér obsahuje interní oscilátor (HSI) o maximální frek-

Architektura	Cortex M4
Velikost FLASH	1024 kB
Velikost RAM	192kB
Max. frekvence hodin	168MHz
Napájecí napětí	1,8-3,3V
Počet IO	82
Periferie	3xI2C, 6xUART, 14xTIM, 2xUSB

Tabulka 3.1: Parametry mikrokontroléru STM32F4

venci 16MHz, interní 32kHz RC (LSI) oscilátor. K dispozici jsou dva vstupy pro externí oscilátory. První pro oscilátor 1 až 24MHz pro všechny sběrnice a periferie a druhý pro RTC - 32.768KHz. STM32F4 dále obsahuje hlídací obvody typu BOR (brownout reset), POR/PDR (Power On/Down Reset) a programovatelný napěťový detektor PVD. Dále obsahuje systém zabezpečení hlavních hodin (CSS), který v případě výpadku externího oscilátoru přepne zdroj hlavních systémových hodin na interní oscilátor o frekvenci 16MHz.

3.1.1 Programovací rozhraní

JTAG

Jde o moderní programovací a testovací rozhraní. Toto rozhraní vzniklo snahou výrobců o sjednocení testování integrovaných obvodů. Pro JTAG je nyní platná norma IEEE 1149.1. Pinout konektoru ovšem v normě není definován a je dán výrobcem.

SWD

Redukcí rozhraní JTAG dostaneme rozhraní SWD. Používá pouze dva signály SWCLK (clock) a SWDIO (data in/out).

Obdobně jako JTAG i SWD podporuje programování a ladění (debug).

3.1.2 Vývojová prostředí

Pro vývoj firmware mikrokontroléru je nutné použít jedno z dostupných vývojových prostředí. Prvním vývojovým prostředím je UVision Keil ve verzi 4 případně 5, který je vyvíjený přímo firmou ARM. Druhou možností je použít prostředí Embedded Workbench firmy IAR Systems. Obě tato vývojová prostředí obsahují omezení pro velikost kódu v trial či free verzích. Proto jsem pro vývoj použil vývojové prostředí Eclipse spolu s kompilátorem GCC pro ARM, který tato omezení nemá.

3.1.3 Knihovna libopencm3

Libopencm3 je knihovna napsaná v jazyce C. Knihovna je vyvíjena jako komunitní projekt pro jádra architektury ARM Cortex M. Kromě samotného jádra poskytuje funkce pro konfiguraci a práci s periferiemi. Výhodou této knihovny je, že podporuje řešení od několika výrobců ARM mikrokontrolérů - ST Microelectronics, TI, NXP, Atmel...

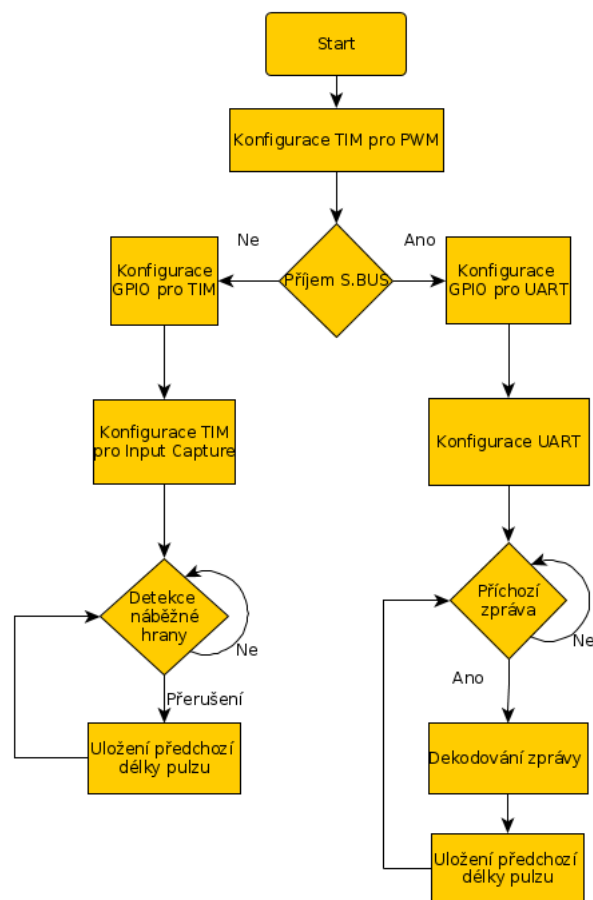
API pro ovládání periférií v mikrokontrolérech od stejného výrobce je též sjednoceno. Zároveň je tato knihovna využita v autopilotu Paparazzi UAV, který je použit v této práci. Alternativními knihovnami jsou SPL a HAL od firmy ST Microelectronics. Výhodou knihovny HAL je možnost použít GUI konfigurační nástroj pro vytvoření projektu. Pro knihovnu libopencm3 zatím podobné řešení neexistuje.

3.1.4 Příjem z vysílače

Jelikož autonomní ovládání má rozšířit manuální ovládání, je nezbytné stále přijímat signál ze země od pilota a dle zvoleného módu patřičně ovládat serva a motor. Proto je signál z přijímače přiveden na vstupní pin mikrokontroléru, kde je následně zpracován. Zvolený pin je možné nastavit pomocí speciálního registru do alternativní funkce, kdy je vstupní signál zpracován jednou z periférií v mikrokontroléru. V našem případě lze zvolit konfiguraci pro UART nebo Timer. První případ umožňuje přijímat signál ve formátu S.BUS či DSM2/DSMX. V druhém případě používáme čítač k dekodování PPM. Čítač je nastaven v režimu input capture, kdy na vstupním kanálu 1 čeká na náběžnou hranu PPM signálu. Okamžik náběžné hrany detekován pomocí hardware a čas čítače je zapsán do příslušného registru. Následně je spuštěno přerušení daného čítače, kde je hodnota vybrána z registru a uložena do bufferu, kterému je posunut index pro uložení dalšího kanálu. Vše je názorně zobrazeno v blokovém diagramu.

3.1.5 Ovládání serva

Pro ovládání serva a regulátoru motoru je využít další čítač, který má nakonfigurované 3 GPIO piny pro alternativní funkci. K těmto pinům jsou připojeny interně 3 kanály timeru, které jsou nakonfigurovány v režimu output capture. Tento režim nabízí celkem 8 možných módů. Pro generování PWM nás zajímají módy PWM1 a PWM2. Rozdíl spočívá v tom,



Obrázek 3.2: Vývojový diagram dekódování PPM nebo S.BUS

že mód PWM1 nastavuje výstup do stavu HIGH při hodnotě čítače menší než je práh-hodnota CCRx registru - daného kanálu. Po překročení prahu je výstup uveden do stavu LOW. Mód PWM2 má funkci inverzní. Hodnota AutoReload registru čítače je nastavena tak, aby perioda čítače odpovídala 20ms. Hodnoty pro jednotlivé kanály jsou vyčítány z bufferu a aktualizovány při přerušení typu update event.

3.2 Napěťové úrovně

Pro napájení mikrokontroléru a okolních modulů je několik možností:

- Z regulátoru střídavého motoru, který disponuje napěťovým regulátorem (BEC)
- Z napěťového regulátoru přímo z akumulátoru
- Ze sekundárního akumulátoru

V práci byla zvolena poslední varianta, která zamezuje vzniku rušení na napájení od spínání motoru.

3.3 Akcelerometr a gyroskop

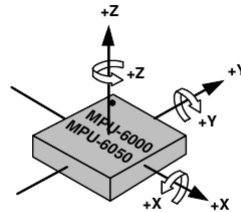
Použitý akcelerometr a gyroskop má označení MPU6050. Tento typ senzoru byl vyroben technologií MEMS. Výrobcem je firma InvenSense. Akcelerometr pracuje na piezoelektrickém principu, gyroskop na principu Coriolisovy síly [7].

3.3.1 Parametry

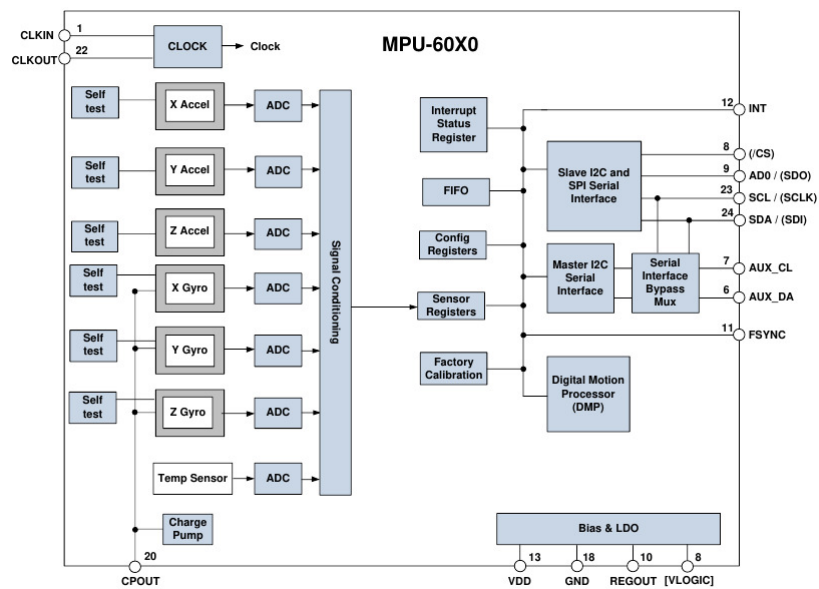
Jedná se o trojosý akcelerometr a trojosý gyroskop, ke kterým je ještě na společném křemíku přidán Digital Motion Processor. Jedná se o procesor s vlastním firmware, který zpracovává naměřená data a poskytuje data vhodná již pro aplikační použití. Akcelerometr poskytuje několik měřitelných rozsahů zrychlení, maximálním je ± 16 [m/s²]. Obdobně je tomu pro gyroskop, kde maximálním rozsahem pro drift v čase je ± 2000 [°/s]. Pro komunikaci s mikrokontrolérem lze využít buď SPI rozhraní, nebo I2C. Obvod dále disponuje pinem pro generování přerušení, jehož příčinu si uživatel může naprogramovat. Dále disponuje pomocnou sběrnicí I2C, ke které lze připojit magnetometr pro získání přesnějších aplikačních dat od DMP [7].

3.3.2 Blokové schéma

Hlavními bloky jsou X,Y,Z Accel a Gyro senzory, které měří dané veličiny v jednotlivých osách. Naměřené hodnoty jsou následně vzorkovány 16-bitovými ADC obvody. Navzorkované hodnoty jsou k dispozici v registru, případně se ukládají do FIFO paměti, odkud si je periodicky vyčítá DMP [7].



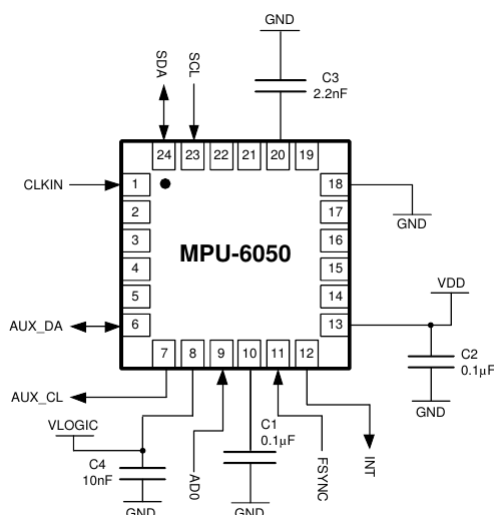
Obrázek 3.3: Definice rozložení os senzoru MPU6050 | Převzato z [7]



Obrázek 3.4: Blokové schéma senzoru MPU6050 | Převzato z [7]

3.3.3 Schéma zapojení

Vývody VDD a GND slouží k napájení obvodu. V práci bylo zvoleno použití sériového rozhraní I2C. K tomuto rozhraní jsou připojeny piny SDA a SCL, jež jsou přes pull-up rezistory o hodnotě 100kOhm připojeny k VCC. Pin AD0 slouží pro výběr I2C adresy a je připojen na vývod, který lze propojit buď s VCC, nebo GND. K pinům VLOGIC, CPOUT a REGOUT jsou připojeny kondenzátory o příslušných hodnotách. K obvodu ještě dále náleží blokovací kondenzátor o hodnotě 0.1 μ F.



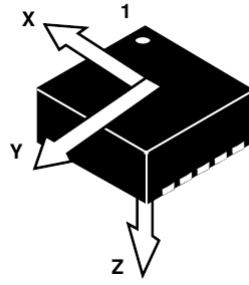
Obrázek 3.5: Schéma zapojení senzoru MPU6050 | Převzato z [7]

3.4 Magnetometr

Senzor magnetického pole nese označení MAG3110. Princip měření magnetického pole je založen na magnetorezistivním jevu. Výrobcem tohoto inteligentního senzoru je firma Freescale Semiconductor.

3.4.1 Parametry

Obvod umožňuje měření vektoru magnetické indukce ve směru os x, y a z. Plný měřitelný rozsah magnetické indukce je od - 1000 μ T do + 1000 μ T. Citlivost senzoru je 0,1 μ T na LSB. Senzor umí mimo měření vektoru magnetické indukce měřit i teplotu v rozsahu od -40 °C do 85 °C. Udávaná citlivost senzoru je 1 C na LSB. Frekvence, s jakou odesílá obvod data obsahující naměřené hodnoty, je možné nastavit. Nejnižší frekvencí je 0,08 Hz. Maximální frekvencí je hodnota 80 Hz. Mikrokontrolér komunikuje se senzorem pomocí I2C sběrnice [8].



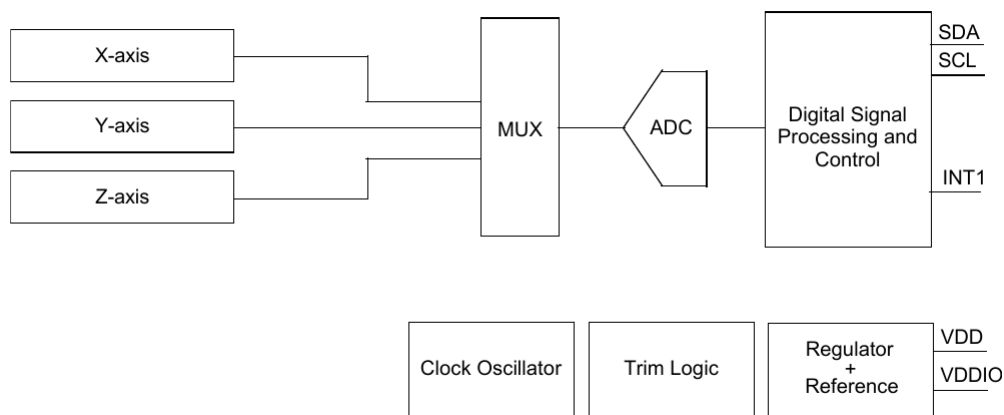
Obrázek 3.6: Definice rozložení os MAG3110 | Převzato z [8]

3.4.2 Blokové schéma

Hlavními komponentami integrovanými v obvodu jsou multiplexer sloužící pro přepínání měření v jednotlivých osách, A/D převodník, hodinový oscilátor, logika pro úpravy, napěťový regulátor spolu s napěťovou referencí a blok provádějící číslicové zpracování signálů a řízení.

Dále jsou v obvodu přítomné registry pro kompenzaci offsetu magnetické indukce ve směrech všech os. Jedná se o Zero-Flux offset, Soft-Iron offset a Hard-Iron offset.

Zero-Flux offset vyjadřuje hodnotu magnetické indukce, která by byla změřena v prostředí bez magnetického pole. Obdobně je Soft-Iron offset hodnota magnetické indukce v prostředí s magnetickými materiály umístěnými v blízkosti senzoru, které deformují magnetické pole. Hard-Iron offset je způsoben permanentními magnety [8].



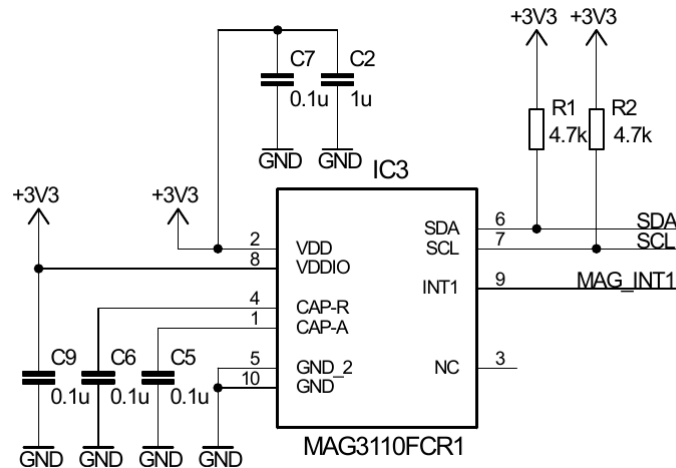
Obrázek 3.7: Blokové schéma senzoru MAG3110 | Převzato z [8]

3.4.3 Schéma zapojení

Vývody VDD a GND slouží pro napájení obvodu. K napájecím vývodům VDD je zapotřebí připojit blokovací kondenzátory o velikostech kapacity 100 nF a 1 μ F. Další kondenzátor je připojen na vývod CAP-A o kapacitě 100 nF. Ten je potřebný pro správnou funkci vnitřního napěťového regulátoru. Účelem kondenzátoru o kapacitě 100 nF připojeného na

vstupu CAP-R je resetování senzoru.

Napětí na vývodu VDDIO určuje napěťové logické úrovně. Na vývod VDDIO je rovněž nutné připojit kondenzátor o velikosti kapacity 100 nF. Pro komunikace jsou zde vývody pro I2C - SDA a SCL. Výstup INT1 slouží pro indikaci naměřených dat. Jsou-li v obvodu naměřena nová data, výstup INT1 přejde z log. 0 do log. 1. Ve stavu log. 1 zůstává, dokud není přečten datový registr. Tento výstup lze využít pro čtení dat. Není tak nutné se periodicky senzoru dotazovat na nová data.



Obrázek 3.8: Schéma zapojení senzoru MAG3110 | Převzato z [8]

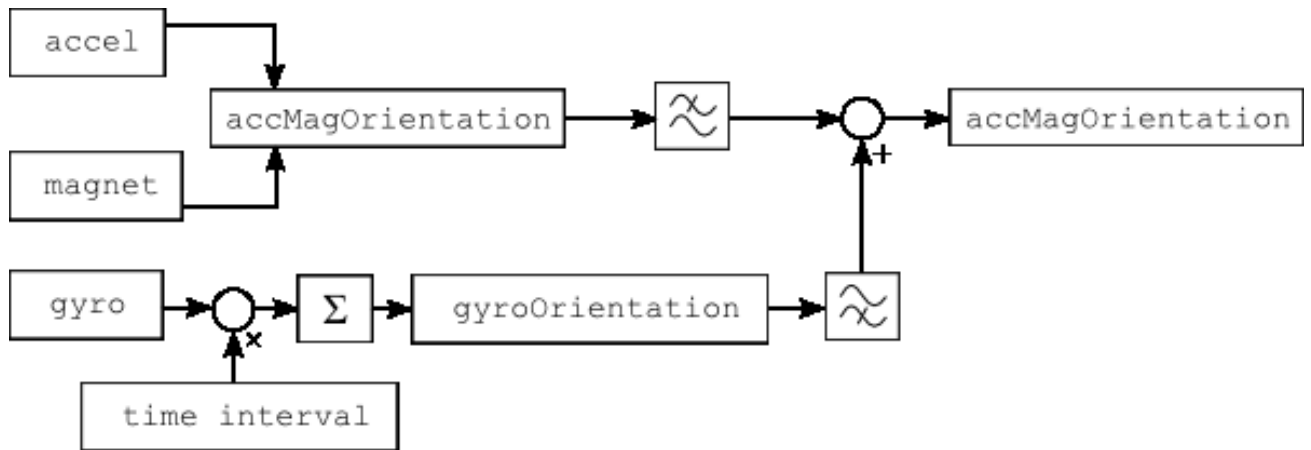
3.5 Sensor fusion

Pro určení směru v 3D prostoru jsou nezbytné 3 úhly - yaw, pitch a roll. Tyto úhly lze získat z naměřených dat z akcelerometru, gyroskopu a magnetometru. Kombinací naměřených dat lze minimalizovat chyby v čase jednotlivých senzorů a získat tak stabilní data. Data získaná tímto procesem jsou nejčastěji reprezentována v podobě Eulerových úhlů nebo kvaternionů.

Blokové schéma na obrázku popisuje algoritmus na principu komplementárního filtru. Z dat akcelerometru a magnetometru je spočítána orientace, která je následně filtrována - dolní propustí. K filtrovaným datům je přičtena korekce pomocí gyroskopu. Výstup gyroskopu je filtrován pomocí horní propusti [9].

3.6 Barometr

Tlakový senzor má označení BMP180. Jedná se o inteligentní senzor vyrobený technologií MEMS založený na piezo-elektrické technologii. Výrobce tohoto obvodu je firma BOSCH [10].



Obrázek 3.9: Blokové schéma pro sensor fusion | Převzato z [9]

3.6.1 Parametry

Obvod umožňuje provádět měření v teplotním rozsahu od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$. Teplotu při měření si lze přečíst z registru. Dále lze měřit tlak pomocí tohoto senzoru v rozsahu od 300hPa do 1100hPa , což odpovídá nadmořským výškám v rozsahu 9000m do -500m , při rozlišení 0.3hPa .

Obvod lze napájet napětím v rozmezí od $1,95\text{ V}$ do $3,6\text{ V}$. Komunikace mezi senzorem a mikrokontrolérem probíhá přes sériové rozhraní I2C. Adresa senzoru je $0x60$.

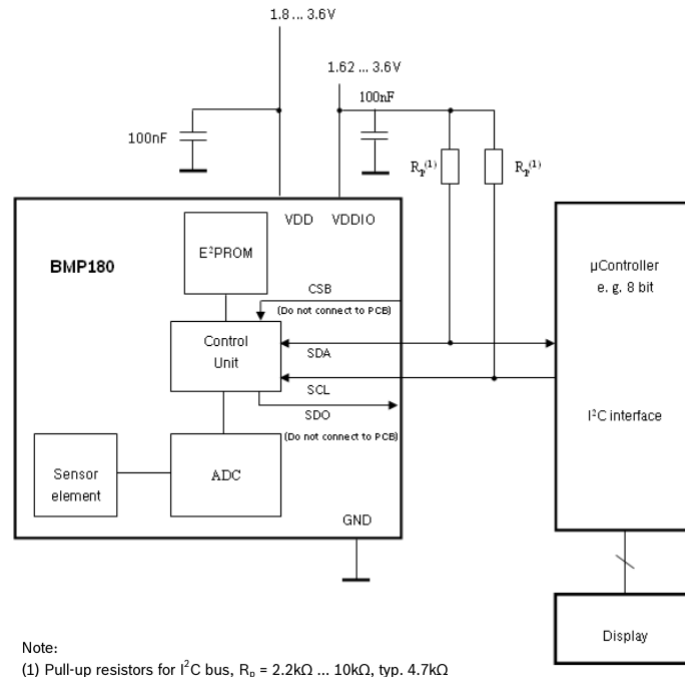
Z hodnoty naměřeného tlaku lze spočítat aktuální nadmořskou výšku dle následujícího vztahu:

$$vyska = 44330 * \left(1 - \left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{1}{5,255}}\right)[m]$$

Proměnná p_0 představuje ve vztahu referenční hodnotu tlaku na úrovni moře - $1013,25\text{ hPa}$. Proměnná p je hodnota tlaku naměřená senzorem [10].

3.6.2 Blokové schéma a schéma zapojení

Obvod BMP180 se skládá ze 4 hlavních bloků. Prvním je samotný piezo-element, který převádí měřený tlak na hodnotu elektrického napětí. Toto napětí je dále zpracováno pomocí ADC do digitální podoby v rozsahu 16 až 19 bitů a uloženo do registru. Pro kalibraci senzoru je zde EEPROM paměť s údaji o kalibraci senzoru. Kontrolní jednotka slouží k nastavení senzoru a komunikaci po I2C sběrnici. Vývody pro napájení senzoru jsou patřičně připojeny a je k nim umístěn blokovací kondenzátor o hodnotě $100\mu\text{F}$. K vývodu VD-DIO je též umístěn kondenzátor o hodnotě $100\mu\text{F}$. Na sběrnici I2C jsou připojeny pull-up rezistory o hodnotě $4,7\text{k}\Omega$ [10].



Obrázek 3.10: Blokové schéma a schéma zapojení senzoru BMP180 | Převzato z [10]

3.7 Senzor rychlosti

Jedná se opět o senzor tlaku, který měří mimo statického tlaku i tlak dynamický. Porovnáním těchto dvou tlaků pomocí Pitotovi trubice je možné určit rychlost letu. Vhodným senzorem je MPXV7002 od společnosti NXP. Jedná se o senzor s analogovým výstupem v rozsahu 0.5V až 4.5V, který měří rozdíl tlaků v rozmezí od -2kPa do +2kPa.

Pro určení rychlosti letu je nutné měřit rozdíl mezi statickým a dynamickým tlakem.

V práci tohoto senzoru nebylo využito. Pro měření přibližné rychlosti jsou použita data ze systému GPS [11].

3.8 Možnosti a typy lokalizací

Nejčastější typ lokalizace je pomocí GPS. Jedná se o řešení, které poskytuje velmi přesné zaměření, zejména nachází-li se model na otevřeném prostranství (v případě přímého výhledu). Kromě metody GPS lze ještě využít zaměření modelu pomocí sítí GSM, respektive jejich vzdáleností od BTS. K určení polohy se používají data z BTS. Ta jsou pak odeslána k operátorovi, který vyhodnotí přibližnou polohu zařízení. Pro tento účel je ale nutné si od operátora vyžádat tuto službu.

Tato metoda vyhledání polohy je však operátorem zpoplatněna. Zároveň neposkytuje tak přesná data o poloze jako lokalizace pomocí GPS. Tento způsob lze využít zejména ve městě s vysokými budovami, kde model nemusí mít přímý výhled na satelity.

Výhodou modulu podporující GSM je možná podpora GPRS, která může být využita pro

přenos dat i na velmi dlouhé vzdálenosti.

3.8.1 Výběr GPS a GSM/GPRS modulu

Jako první rozhodnutí bylo nutné zvážit, zda zvolit jeden modul, který obsahuje jak GPS, tak i GSM/GPRS, či dva moduly, které mají tyto technologie udělané separátně. Jelikož se jedná o velice široce rozšířené technologie, je výběr oddělených modulů nepřeborný. Za první nevýhodu lze považovat nutnost použití dvou komunikačních sběrnic USART. Další významnou nevýhodou by byla velikost zastavěného místa v zařízení. Za největší nevýhodu považují při použití oddělených modulů vyšší celkový odběr zařízení. Proto byl do modelu vybrán modul, který kombinuje GPS a GSM/GPRS dohromady - SIM908. Tento modul byl vybrán z důvodu dostupnosti, vyhovujícím parametrům a spolehlivosti z předchozího projektu. Jistou nevýhodou tohoto řešení je skutečnost, že pro funkci GPS je nutná funkční část GSM/GPRS modulu. V návrhu zařízení jsou ovšem využity obě části. Zmíněný modul disponuje dvěma integrovanými konektory pro anténní výstup - uFL. Pro příjem signálů GPS a GSM/GPRS je nutné zvolit a připojit ještě vhodné aktivní antény. Zvoleným řešením je duální anténa 2J620P.

Pro komunikaci s modulem je využita sběrnice UART. Modul obsahuje celkem dvě sběrnice UART. První je určena pro ovládání zařízení a výměnu dat, druhá pro aktualizaci firmware modulu. Pro účely práce je využita pouze první sběrnice [12].

3.8.2 Schéma zapojení

Mikrokontrolér komunikuje s GSM/GPS modulem pomocí sběrnici UART. K modulu je nutné ještě připojit dva piny mikrokontroléru. První pin slouží k zapnutí (přechod ze standby režimu do aktivního a naopak). Druhý je pro povolení externího napájení pro anténu. Modul obsahuje interní zdroj pro napájení aktivní antény. Toto napětí dosahuje pouze 2.8V.

GSM/GPS modul obsahuje rozhraní pro komunikaci se SIM kartou. Modul podporuje SIM karty s napájením 1.8V, 8V i 3V. Při vložení SIM karty nastaví interní zdroj napětí na 1.8V a odešle data. Jestliže SIM karta neodpoví, je napětí následně zvýšeno na 3V a postup se opakuje.

Datový vodič DATA obsahuje RC článek. Ten je přítomen z důvodu zamezení rušení GSM pásma vlivem komunikace.

3.8.3 NMEA formát

Zpráva ve formátu NMEA začíná vždy symbolem \$. Následujících 5 znaků slouží k identifikaci producenta (dva znaky) a typ zprávy (3 znaky). Data následující za těmito znaky jsou mezi sebou oddělena čárkou. Nejsou-li data pro daný údaj dostupná, zůstane místo prázdné. V případě, že je ke zprávě přidán kontrolní součet, je na konci zprávy hvězdička

a vypočítaný kontrolní součet. Zpráva je ukončena znaky `\r\n`.

3.9 Regulátor

Návrh autopilota počítá i s výměnou ESC. Účelem výměny tohoto funkčního bloku je získání kompletní kontroly nad řízením BLDC motoru. Pro tento účel je využito stávající řešení od firmy ST Microelectronics. Jedná se o softwarovou knihovnu FOC jejíž účelem je vektorové řízení asynchronních motorů. Vychází z modelu popisujícího jak elektromagnetické tak elektromechanické jevy ve stroji. Díky tomuto modelu lze efektivně řídit okamžité hodnoty toků a proudů ve stroji a v důsledku rovněž okamžitou hodnotu momentu stroje. Prostorové vektory veličin v modelu stroje jsou dále transformovány pomocí Clarkovy a Parkovy transformace do/z souřadného systému svázaného s prostorovým vektorem spřaženého rotorového nebo satorového magnetického toku. V řídicí struktuře se v ustáleném stavu jeví zadávané hodnoty jako stejnosměrné. Na asynchronní pohon s vektorovým řízením pak lze pohlížet jako na stejnosměrný pohon s cizím buzením, kde lze řídit nezávisle tok motorem a jeho moment.

3.10 Autopilot

3.10.1 Ardupilot

Jedná se open-source UAV platformu, která umožňuje ovládat multikoptéry, klasická letadla, helikoptéry a pozemní rovery. Ekosystém této platformy tvoří hardware, firmware autopilota a software pro PC, který umožňuje plánovat trasu a následně ji po návratu vizualizovat a analyzovat. Počátek platformy se datuje do roku 2007, kdy vznikla na popud DIY Drones komunity. Platforma, jak už z názvu vyplývá, je postavena na platformě Arduino. Jako řídicí deska se dlouhou dobu používala ArduPilotMega, na němž osazený mikrokontrolér byl z rodiny ATmega od firmy Atmel. Jednalo se o 8-bitový mikrokontrolér typu RISC. Novější verze řídicích desek opouští doménu 8-bitových mikrokontrolérů a namísto nich se používají 32-bitové mikrokontroléry, které nabízejí větší možnosti. Jedná se zejména o Pixhawk a Pixracer.

Model Pixhawk disponuje pro zvýšení bezpečnosti koprocesorem, který hlavní mikrokontrolér v případě chyby uvede do bezchybového stavu. Tento bezpečnostní mechanismus je využit i v zapojení letového kontroléru v této práci. Pro naplánování letového plánu lze využít GUI program pro PC - The Mission Planner. Pro nahrání letového plánu lze využít buď USB, nebo bezdrátové rozhraní pro telemetrii [13].

3.10.2 Paparazzi UAV

Jedná se též o open source platformu, která podporuje multikoptéry, klasická křídla i helikoptéry. Tato platforma byla v práci využita pro firmware autopilota [14].

3.11 Ukládání dat

Pro ukládání velkého množství dat - zejména log a letový plán - je jako úložiště použita paměťová SD karta. SD karta (Secure Digital) je nástupce karty MMC (MultiMedia-Card), kterou vyvinuly v roce 1999 firmy Sandisk, Matsushita a Toshiba. Uvnitř těchto paměťových karet je použita nevolativní paměť typu FLASH.

U tohoto typu karet je možné dosáhnout přenosové rychlosti až 100 Mbit/s. Kartou lze napájet napětím v rozmezí 2,7 až 3,6 V (typicky 3,3 V). Frekvence hodinových impulsů může být až 25 MHz. Kapacita je omezena na 2 GB. V současnosti jsou na trhu k dispozici modernější verze tohoto typu paměťové karty, konkrétně SDHC (SD 2.0) a SDXC (SD 3.0). SD karta umožňuje několik módů komunikace:

- 1-bitový SD mód kompatibilní s MMC kartami
- 4-bitový SD mód
- SPI mód

V SD módech jsou příkazy kartě a její odpovědi vedeny po jednom vodiči (CMD) a bloky dat pro čtení nebo zápis po jednom (1-bitový SD mód), případně čtyřech (4-bitový SD mód) datových vodičích (DAT0-3). V SPI módu jsou data a příkazy do karty přiváděny jedním vodičem (MOSI), odpovědi karty a data do mikrokontroléru druhým vodičem (MISO).

Pro komunikaci s SD kartou byl zvolen SPI mód. Důvodem byly především zkušenosti s SPI rozhraním a možnost využít ke komunikaci periférii SPI zvoleného mikrokontroléru [15].

3.11.1 Souborový systém

Souborový systém označuje způsob organizace dat na paměťovém médiu ve formě souborů a adresářů. Důvodem vytvoření této struktury v úložišti je zajistit efektivní ukládání informací a jejich následné čtení.

3.11.2 FAT16

Souborový systém typu FAT (File Allocation Table) se poprvé objevil v QDOSu a v jisté obměně se používá dodnes. Tento souborový systém ukládá informace o alokaci do jednotlivých clusterech do tabulky. Cluster - alokační blok - je nejmenší možná jednotka, kterou lze na úložném médiu alokovat. Paměť je rozdělena na sektory, nejčastěji o velikosti 512 B. Jeden cluster obsahuje pevný počet sektorů, který je vždy roven mocnině dvou. Mezi FAT souborové systémy patří FAT12, FAT16 (zkráceně nazývaný jen FAT) a FAT32. Tyto souborové systémy se mezi sebou liší je v malých rozdílech - umístění kořenového adresáře, velikost záznamů v tabulce FAT. Velikost clusteru FAT16 může být od 512 B

(jeden sektor) po 64 kB. To omezuje velikost oddílu zformátovaného tímto souborovým systémem na 4 GB. Maximální velikost souboru může být 4 GB. FAT souborové systémy se sice stále používají, ačkoliv by se dalo říct, že souborové systémy typu FAT jsou dnes již překonané a zastaralé, jejich nesporná výhoda tkví v jejich použitelnosti ve většině operačních systémů a v jejich jednoduchosti [15].

Kapitola 4

Telemetrické systémy

Tyto systémy slouží jako obousměrné kanály pro přenos dat. Z letounu se typicky přenášejí letové údaje např. rychlost, výška, napětí akumulátoru... Ze země se do letounu dají poslat změny letového plánu případně jiné příkazy, které si uživatel pro daný letoun nadefinuje.

4.1 XBee

Rodina XBee modulů pochází od společnosti Digi International. Jejím charakteristickým rysem jsou stejné konstrukční rozměry a rozložení pinů napříč jednotlivými moduly. V portfoliu lze nalézt moduly disponující WiFi, Bluetooth i RF.

Moduly mohou komunikovat point-to-point či vytvářet síťové topologie např. hvězdicovou. Z hlediska zapojení je nutné modul připojit k Vcc a GND, dále Rx a Tx vodiče pro komunikaci po UART. Modul samotný nabízí I/O piny, které lze například použít pro vzdálený reset mikrokontroléru na delta-křídle.

XBee podporuje 2 módy pro komunikaci. První mód je tzv. transparentní datový mód, kde data přijatá na Rx pinu vysílače jsou přímo poslána do přijímače. Pro nastavení modulu se v tomto módu používají AT příkazy. Druhý mód - API mód- posílá strukturovaná data v paketu. Výhodou tohoto formátu je podpora adresování, nastavení parametrů zprávy, možnost ovládání I/O pinů, ... V následující tabulce jsou shrnuty parametry nejvhodnějších modulů. Pro konfiguraci modulu lze využít PC GUI aplikaci XCTU [16].

Model	XBee ZigBee	XBee 868LP
Frekvence	2.4GHz	868MHz
Rychlost přenosu	250 kbit/s	80 kbit/s
Komunikační rozhraní	UART	UART

Tabulka 4.1: Přehled jednotlivých XBee modelů a jejich parametrů

4.2 3DR radio

Jedná se o telemetrický modul od společnosti 3DRobotics s velkým dosahem a open source firmware. Modul je k dostání na frekvencích 900MHz a 433MHz. Maximální přenosová rychlost je 250 kbit/s.

Citlivost přijímače je -121 dBm, vysílací výkon až 20dBm. Konfigurace modulu je pomocí AT příkazů [18].

4.3 SIM908

Jak již bylo zmíněno, pro určení polohy byl zvolen modul SIM908, který kromě GPS disponuje i GSM/GPRS technologií. Druhou zmíněnou technologií lze využít pro přenos telemetrie - konkrétně následujícími způsoby:

- Textové zprávy (SMS)
- Mutlimediální zprávy (MMS)
- Datový přenos (gateway do internetu)

Pro práci s tímto modulem je vytvořena knihovna, jejíž API nabízí zmíněné funkce bez nutnosti znalostí AT příkazů. Ty jsou zde pro úplnost popsány. První z nich je kontrola komunikace s modulem. Mikrokontrolér odešle řetězec znaků AT v podobě:

```
AT\r\n
```

Modul by na tento příkaz měl odpovědět následujícím řetězcem:

```
AT\r\n\r\nOK\r\n
```

Na uvedeném příkazu si lze rozebrat způsob komunikace s modulem. Naskytují se tři řešení.

Prvním z nich je nastavit timeout. V nekonečné smyčce následně čekáte na přijatý znak. Pokud tento znak nepřijmete do nastavené doby, program pokračuje dále. Nevýhodou tohoto řešení je, že pokud modul pošle další zprávu po vypršení timeoutu, my se jí nikdy nedozvíme.

Dalším řešením je čekání na řetězec `\r\nOK\r\n`. Tímto řetězcem je ukončena většina příchozích zpráv. V některých případech, ale modul může poslat jiný ukončovací řetězec. A posledním řešením je přijetí znaků v přerušení.

Pro přenos telemetrie je nezbytná SIM karta, která slouží k autentizaci a provozu v síti operátora. Pro kontrolu SIM karty - zda není blokována PIN kódem - slouží funkce AT_CPIN. K tomu slouží následující příkaz:

```
AT+CPIN?\r\n
```


V případě, že je vše v pořádku, je očekáván následující řetězec:

```
AT+CPIN?\r\n\r\n+CPIN: READY\r\n\r\nOK\r\n
```

Pro kontrolu síly signálu modul disponuje příkazem AT_CS. Přijatá data mají následující formát:

```
AT+CSQ\r\n\r\n+CSQ: XX,Y\r\n\r\nOK\r\n
```

Hodnota na místě XX určuje sílu signálu a Y chybovost přenosu v procentech. Pro přenos dat musí být modul zaregistrován do sítě. Pro kontrolu, zda je modul zaregistrován slouží tato funkce.

```
AT+CREG?\r\n\r\n+CREG: X,Y\r\n\r\nOK\r\n
```

První hodnota X značí, zda je modul zaregistrován v síti. Druhá hodnota Y udává technologie komunikace, které je možné použít (GSM, UTRAN, HSDPA a další). Pro odeslání SMS zprávy je nutné zadat následující příkaz.

```
AT+CMGS="PhoneNumber"\r\n
```

Modul po tomto příkazu čeká na přijetí znaku '>' a následně textu se zprávou. Sekvence pro ukončení je:

```
\r\n0x1A\r\n
```

Znak 0x1A je znak pro odeslání zprávy. Zde je ukázka zaslání SMS zprávy:

```
AT+CMGS="+420XXXYYYZZZ"
```

```
> Test SMS send from UAV. Have a nice day.\r\n0x1A\r\n
```

Knihovna implementuje tento příkaz jako sendSMS. Této funkci je předáno telefonní číslo a zpráva.

```
void sendSMS(char *phone\textunderscore number, char *message)
```

Ke čtení přijatých SMS zpráv slouží tento AT příkaz:

```
AT+CMGL="REC UNREAD"\r\n
```

Pro připojení k modulu k internetu slouží následující funkce. První potřebnou funkcí je AT_CGATT, která povoluje připojení skrze GPRS. Očekávaná návratová hodnota musí mít tento formát:

```
AT+CGATT=1\r\n\r\nOK\r\n
```

Po této funkci je již modul připojen do sítě a stačí jen navázat spojení:

```
AT+CIPSTART="typ", "doména", "port"\r\n\r
```

Parametrem typ se zamýšlí typ transportní vrstvy - UDP nebo TCP. Doména je doménové jméno cílového serveru a port je číslo portu na vzdáleném serveru. Následně lze odeslat data pomocí příkazu `AT+CIPSEND` který umožňuje odeslat až 1352 bytů dat. Pro komunikaci se serverem jsou v knihovně implementovány funkce `parseData` a `sendData`. Pro hrubou lokalizaci lze použít funkci `parseCellID`.

```
void parseCellID(char *data, char *mcc, char *mnc, char *cellID, char *lac)
```

Modul se přepne do tzv. inženýrského módu a vypíše seznam dostupných BTS stanic. Z těchto dat je vyčtena BTS stanice, ke které je modul připojen. Tato data lze následně porovnat v tabulce s kódovými označeními BTS a tím určit přibližnou polohu.

Pro komunikaci s GPS částí slouží následující funkce. První z nich slouží k zapnutí - hodnota 1 - a vypnutí - hodnota 0 - modulu.

```
AT+CGPSPWR=1\r\n
```

Očekávaný řetězec je:

```
AT+CGPSPWR=1\r\n\r\nOK\r\n
```

Při studeném startu je ještě nezbytné provést reset tímto příkazem:

```
AT+CGPSRST=0\r\n\r\nOK\r\n
```

Následně se již lze dotazovat na GPS souřadnice. Souřadnice jsou formátovány v NMEA zprávě typu GGA. Součástí této zprávy je informace, zda je pozice platná.

Pro čtení informací z této zprávy slouží funkce `parseGPS`, která na vstupu očekává několik ukazatelů. V prvním ukazateli jsou předána data přijatá z modulu, ostatní ukazatele slouží k předání zeměpisné šířky a délky, času, počtu viditelných satelitů a také informaci, zda jsou přijatá data už platná [12].

```
uint8 parseGPS(char *data, char *Latitude, char *Longitude, char *time, char *satellite)
```

4.4 LoRa

LoRa je proprietární typ modulace, který využívá techniku širokopásmové lineární modulovaných frekvenčních pulzů pro kódování informace. Tato modulovaná frekvence se v čase zvyšuje a zmenšuje.

Pro příjem a vysílání slouží čip SX1276, který umožňuje komunikaci na velmi velkou vzdálenost s minimálním příkonem. Citlivost přijímače je až -148dBm. Kromě LoRa modulace disponuje čip také (G)FSK modulací na několika pracovních frekvencích - 168MHz, 434MHz, 470MHz, 868MHz a 902MHz. Pro komunikaci s mikrokontrolérem se používá rozhraní SPI. Na čipu lze dále nalézt periferie typu UART a I2C, které slouží pro vzdálené ovládání obvodů připojených na tyto sběrnice.

4.5 FPV

Na závěr je prezentován modul FPV, který neslouží pro přenos klasických telemetrických dat, ale k přenosu real-time video dat. Kromě modulu samotného je ještě nezbytné dovybavit delta-křídlo vhodnou kamerou a operátora na zemi ještě FPV displejem nebo brýlemi. Většina FPV systému využívá pro přenos video dat frekvence 5.8GHz, které lze využít ve většině států na planetě. Alternativami jsou frekvence 900MHz, 1.3GHz a 2.4GHz. Poslední frekvence je většinou ale již využívána RC soupravou a dalšími zařízeními. FPV systémy pracující na frekvenci 5.8GHz rozdělují toto pásmo typicky na 32 případně 40 kanálů, tudíž nedochází k interferenci video přenosů jednotlivých pilotů. Výkon vysílače je limitován na 25mW, proto je vhodné použít pro příjem směrovou anténu s velkým ziskem. Video data jsou přenášena typicky ve formátu NTSC případně PAL - jedná se tedy o analogový signál. Důležitými parametry jsou počet televizních řádků, barevné podání, latence přenášeného signálu a dynamický rozsah.

Kapitola 5

Závěr

V diplomové práci jsem se zabýval projektem autonomního létajícího prostředku. Úkolem bylo navrhnout a sestavit létající prostředek typu delta-křídlo a vybavit jej vhodným hardware, který umožní manuální a autonomní řízení. Dále jej doplnit modulem, který bude přenášet údaje o telemetrii do stanice na zemi. Při řešení tohoto zadání jsem se postupně soustředil na čtyři hlavní problémy:

- Prvním byla samotná konstrukce delta-křídla.
- Druhým problémem byl výběr a osazení hardwarem, který umožní pilotovi platformu ovládat manuálně.
- Třetím úkolem bylo dovybavit platformu mikrokontrolérem, senzory a firmware, aby byl schopen letět dle zadaného letového plánu plně autonomně.
- Posledním problémem bylo vybrat vhodný telemetrický modul, který by umožnil sledovat letové parametry a ověřit si, že autonomní letový režim funguje spolehlivě.

Nejprve bylo nutné vyřešit hardwarovou stránku modelu. Model byl sestaven dohromady kompletně od začátku. Bylo nutné najít a vybrat vhodný tvar a materiál pro základ delta-křídla. Dále jsem se věnoval přehledovému popisu hardware nutnému pro samotný let. Následně jsem se věnoval detailnějšímu popisu jednotlivých bloků. Zde jsou popsány i ty části, které nejsou přímo na delta-křídle, ale jsou pro let přímo či nepřímo nutné (RC vysílačka, nabíječka LiPo akumulátorů, ...).

Práci jsem navíc rozšířil dle zadání o hardware umožňující autonomní let. Jedná se zejména o modul GPS, IMU, barometru a řadiče BLDC. Hardware naskýtá možnosti pro další rozšíření do budoucích prací např. mapování terénu, doprava a shoz předmětu na určené místo...

Pro autonomní řízení jsem se rozhodl použít již dostupný firmware - autopilota. Z několika vyvinutých řešení jsem jako nejvhodnější vybral Paparazzi UAV. Tento firmware je napsán v jazyce C a založen na knihovně libopenm3, která umožňuje sestavit tento firmware na

architektuře mikrokontrolérů ARM Cortex. V práci byl zvolen mikrokontrolér STM32F4 od firmy ST, především z důvodu použití v předmětech na Katedře aplikované elektroniky a telekomunikací. Jako druhý mikrokontrolér byl zvolen STM32F1 pro řízení BLDC motoru. Důvodem rozdělení je zejména využití Field Oriented Control knihovny, která využívá rozdílné knihovny pro přístup k periferiím, konkrétně Standard Peripheral Library. Dalším důvodem je bezpečnost. Jelikož se jedná o prototyp, je vhodné oddělit navigační a řídicí část tak, aby při chybě v navigační části mohla řídicí část uvést delta-křídlo do bezpečného stavu - delta-křídlo začne pomalu ve spirále klesat k zemi. Pro vyhnutí se této situaci je na obou mikrokontrolérech zapnutá periferie watchdog, která resetuje program při chybě.

Poslední kapitola se zabývá dostupnými telemetrickými moduly, které lze využít pro přenos dat. Lze si tedy zobrazit údaje a polohu delta-křídla na aplikaci na PC. Zároveň lze stejnou aplikaci použít i pro změnu letového plánu za letu.

Literatura

- [1] *RC novinky* [online]. 2016[2.5.2016]. Dostupné z: <http://www.rcnoviny.cz/>
- [2] *Kolmanl - RC modelářství* [online]. 2016[2.5.2016]. Dostupné z: <http://www.kolmanl.info/>
- [3] *Slideplayer - Servo presentation* [online]. 2016[2.5.2016]. Dostupné z: <http://slideplayer.es/slide/5496635/>
- [4] *RCLAB - Brushless DC motor* [online]. 2016[2.5.2016]. Dostupné z: <http://www.rclab.info/2014/01/the-basics-of-electric-power-brushless.html>
- [5] *Wikipedia - RC encoding* [online]. 2016[2.5.2016]. Dostupné z: www.api.ning.com/files/RC_Receiver_Timing_Diagram1.jpg
- [6] *STM32F4 Reference manual* [online]. 2016[2.5.2016]. Dostupné z: http://www2.st.com/content/ccc/resource/technical/document/reference_manual/3d/6d/5a/66/b4/99/40/d4/DM00031020.pdf
- [7] *MPU6050 Datasheet* [online]. 2016[2.5.2016]. Dostupné z: <http://43zrtwysvxb2gf29r5o0athu.wpengine.netdna-cdn.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000-Datasheet1.pdf>
- [8] *MAG3310 Datasheet* [online]. 2016[2.5.2016]. Dostupné z: http://www.nxp.com/files/sensors/doc/data_sheet/MAG3110.pdf
- [9] *Sensor fusion* [online]. 2016[2.5.2016]. Dostupné z: <http://plaw.info/2012/03/android-sensor-fusion-tutorial/>
- [10] *BMP180 Datasheet* [online]. 2016[2.5.2016]. Dostupné z: <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/BST-BMP180-DS000-09.pdf>
- [11] *MPXV7002 Datasheet* [online]. 2016[2.5.2016]. Dostupné z:

http://www.nxp.com/files/sensors/doc/data_sheet/MPXV7002.pdf

[12] *SIM908 Datasheet* [online]. 2016[2.5.2016]. Dostupné z: <http://www.tme.eu/en/Document/0cf24e97f96c35b104969e5c38e1923e/sim908d.pdf>

[13] *Ardupilot* [online]. 2016[2.5.2016]. Dostupné z: <http://www.diydrones.com/>

[14] *Paparazzi UAV* [online]. 2016[2.5.2016]. Dostupné z:

http://wiki.paparazziuav.org/wiki/Main_Page

[15] *FAT16/32* [online]. 2016[2.5.2016]. Dostupné z: <https://technet.microsoft.com/en-us/library/cc940351.aspx>

[16] *XBEE Datasheet* [online]. 2016[2.5.2016]. Dostupné z: <https://www.sparkfun.com/datasheets/Wireless/Zigbee/XBee-Datasheet.pdf>

[17] *3dr radio Datasheet* [online]. 2016[2.5.2016]. Dostupné z: <https://3dr.com/wp-content/uploads/2013/10/3DR-Radio-V2-doc1.pdf>

[18] *3dr radio Datasheet* [online]. 2016[2.5.2016]. Dostupné z: <http://www.semtech.com/wireless-rf/rf-transceivers/sx1272/>