

nanoQUAD rev.1

vývojová zpráva
Ing. Jaromír Dvořák, prosinec 2011



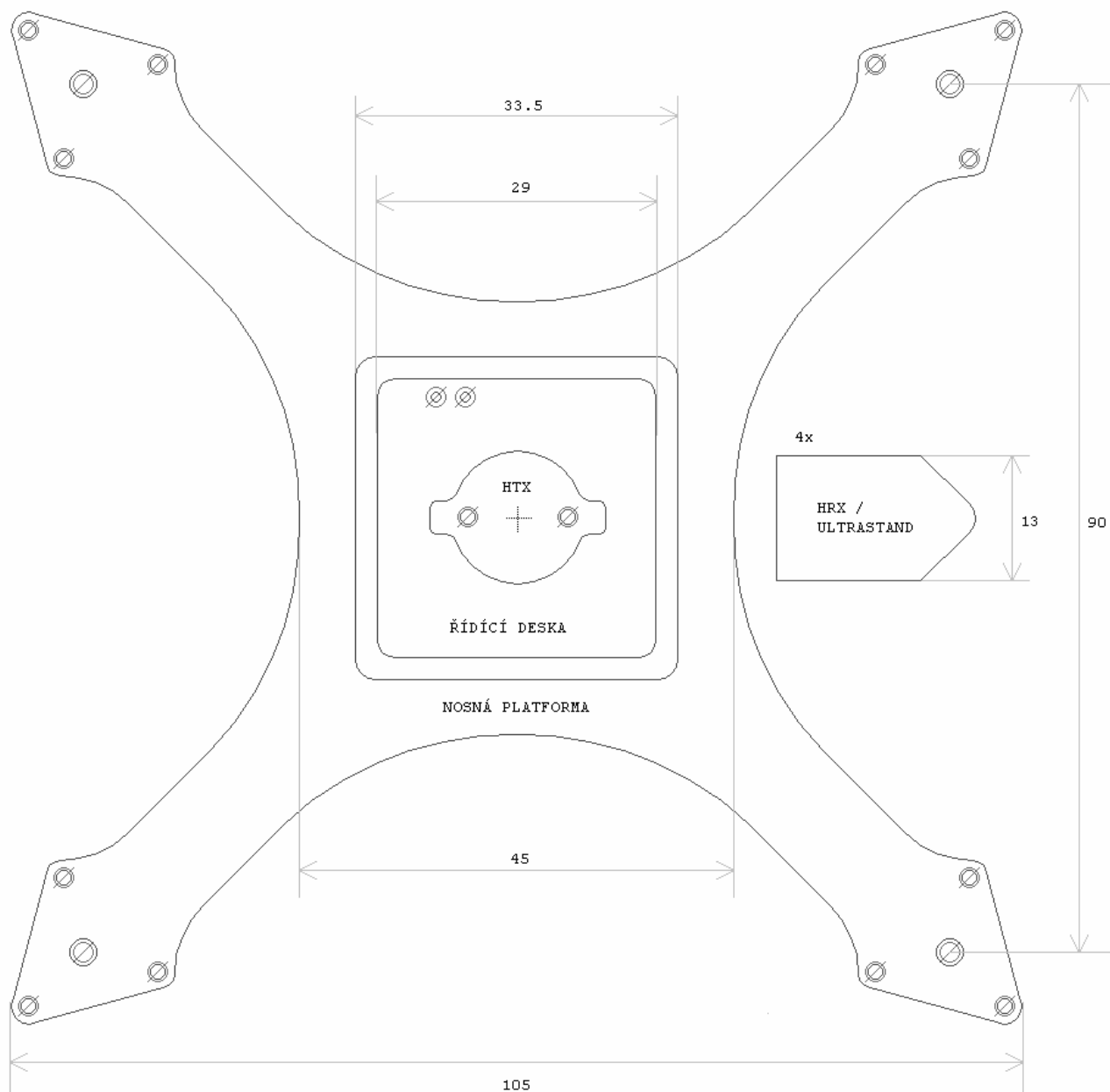
Úvod

Zařízení bylo vyvinuto pro ČVUT FEL za účelem

Základní údaje

Mechanické parametry zařízení

- Rozměry (bez vrtulí) 105x105mm
- Rozměry (včetně vrtulí) 171x171mm
- Letová hmotnost 55g
- Maximální tah motorů 1.1N
- Průměr vrtule 82mm
- Vzdálenost osy vrtule od středu 63.6mm
- Nosný materiál čtyřvrstvá DPS (kuprexit) d=1.5mm



Elektrické parametry zařízení

- Napájecí napětí 3.1 - 4.2 V (jeden lithium-polymerový článek)

- Odběr proudu max. 8A při plném výkonu
max. 4A při visení
max. 300mA bez motorů

Desky plošných spojů

- Centrální řídicí deska se senzory, antény a hlavním mikroprocesorem oddělená pružnými členy
- Nosná platforma se senzory, pomocnými mikroprocesory a motory
- Deska modulu rovinného ultrazvukového vysílače (HTX)
- 4 x Deska modulu rovinného ultrazvukového přijímače (HRX) s funkcí přistávací vzpěry

Aktuátory, senzory

Aktuátory

- 4 bezkartáčové synchronní motory (AP-02) s kuličkovými ložisky a přímým náhonem na vrtuli řízené elektronickým komutátorem



Senzory

- 3D gyro (L3G4200D)
- 3D accelerometer (LIS3DH)
- 3D magnetometer (HMC5883)
- Barometr - výškoměr (MPL3115A2)
- Vertikální infračervený dálkoměr (VCNL4000)
- Měření intenzity ambientního osvětlení (VCNL4000)
- Vertikální ultrazvukový dálkoměr (MA40S4S + MA40S4R)
- Všesměrový sonar v horizontální rovině (4x SPM0204UD5 + 1xUS40KT-01)
- Vertikální barevná VGA kamera (TCM8230MD)
- GPS (VENUS638FLPX-L)
- Měření otáček motorů (jejich řídicí mikroprocesory)
- Měření teploty
- Měření celkového proudu a napětí baterie

Komunikační rozhraní

drátové

- 4x ISP/SPI konektor pro programování/debugování 8-bitových procesorů AVR
- 3x JTAG/USART konektor pro programování/debugování/komunikaci 32-bitových mikroprocesorů Cortex-M STM32

bezdrátové

- ShockBurst 2.4GHz od NORDIC (NRF24L01)
- Možnost využití ultrazvukových transducérů ke komunikaci

Zdroj energie

- Lithium-Ion polymerový článek (např. ZIPPY 450mAh 20C single cell) nebo ekvivalentní



Datové úložiště

- Slot pro kartu micro-SD

Mikroprocesory

- Cortex-M4 STM32f405 jako hlavní mikroprocesor
- 4x AVR ATMEGA168 pro řízení bezkartáčkových motorů a měření jejich otáček
- Cortex-M3 STM32F103TB pro řízení rovinného sonaru
- Cortex-M3 STM32F103TB pro zpracování obrazu z vertikální kamery

Mechanická konstrukce a rozmístění částí

Zařízení se skládá ze dvou základních fyzicky oddělitelných komponent

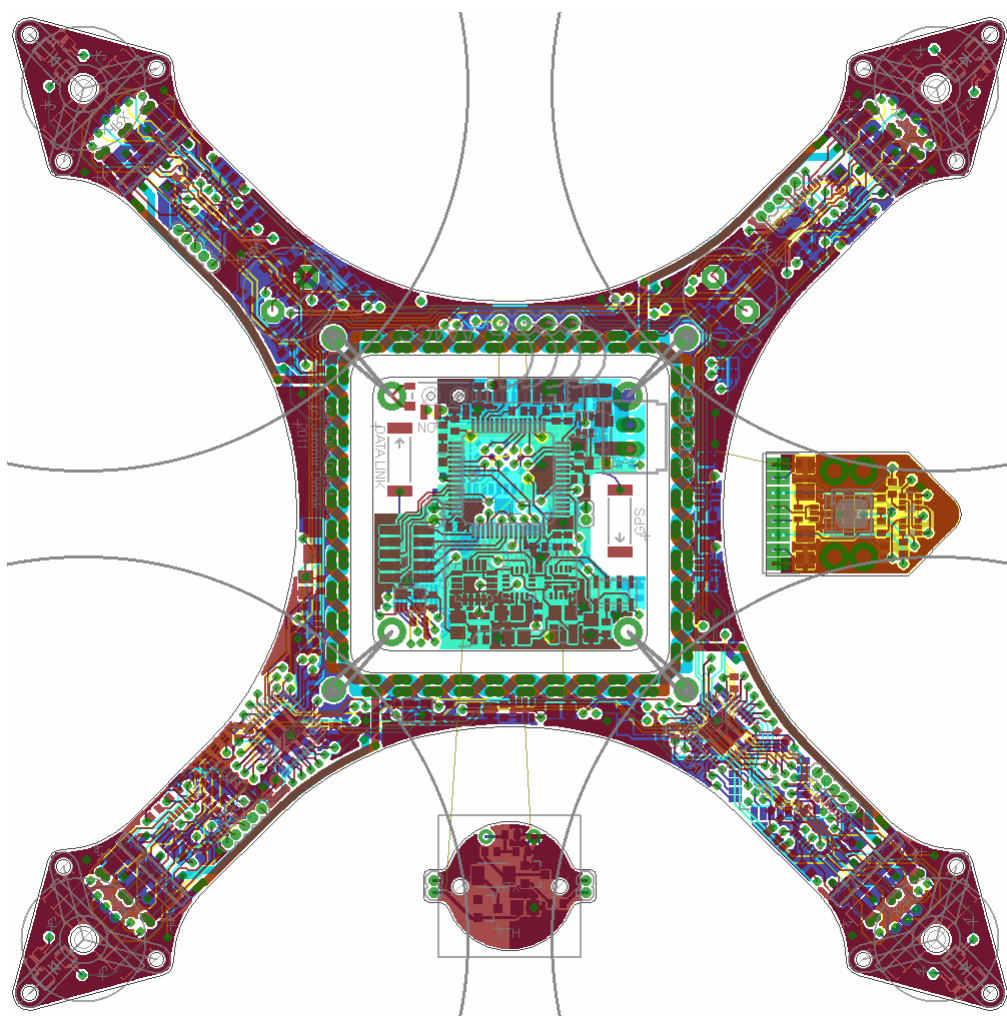
1. Řídící jednotka
2. Nosná platforma

Centrální řídicí jednotka obsahuje baterii, hlavní mikroprocesor, inerciální senzory, magnetometr, barometr, GPS, vysílač pro horizontální rovinný sonar a bezdrátový komunikační modul. Nosná platforma obsahuje motory a obvody pro jejich řízení, horizontální rovinný sonar, vertikální ultrazvukový dálkoměr, vertikální infračervený dálkoměr a kameru.

Centrální řídicí jednotka je uchycena v nosné platformě pružnými členy (silikonové gumičky). Hlavním důvodem k tomuto rozdělení byla snaha omezení přenosu vibrací z motorů na citlivé senzory (akcelerometr, barometr, gyro). Z tohoto důvodu je baterie umístěna na spodní straně řídicí jednotky pro zvýšení její hmotnosti a tedy snížení rezonanční frekvence a také pro zvýšení stability rotačního subsystému posunutím těžiště dolů (článek lze upevnit na spodní stranu jednotky – na kovový kryt mikro-SD slotu a na povrch obvodu GPS uchytit například oboustrannou lepicí páskou). Modularita rovněž otevírá v budoucnu možnosti snadné výměny centrální jednotky za účelem specializace jednotlivých členů formace.

Každá z komponent funguje jako samostatný funkční celek. Miniaturní řídicí jednotku s baterií lze použít samostatně pro nejrůznější účely, od logování dat ze senzorů na micro-SD kartu, přes bezdrátovou inerciální jednotku odhadování orientace až po řízení jiného létajícího stroje. Samotnou nosnou platformu lze použít pro identifikaci parametrů, vývoje algoritmů pro specializované senzory (rovinný sonar, kamera) či jako základ jiného létajícího stroje.

Řídicí jednotka je s nosnou platformou propojena čtyřmi vodiči. Z toho dva tvoří silové napájení a další dva komunikační sběrnici **I2C** (SDA,SCL). Vlastní propojení by mělo být kvůli minimalizaci přenosu vibrací realizováno pružným kabelem.



Elektrická konstrukce a pravidla návrhu

Napájení

Celé zařízení je napájeno z jednoho lithium-ion polymerového článku fyzicky umístěného na řídicí jednotce. Silové napájení je spolu s komunikační sběrnici vedeno ohebným kabelem na nosnou platformu. Zařízení obsahuje množství napěťových zdrojů poskytujících napájení pro subsystemy. Dle vybíjecí charakteristiky lithium-ion polymerových článků je článek zcela vybitý při poklesu napětí na 3.0V. Abychom se vyhnuli nutnosti použití dražších spínaných step-up regulátorů a zároveň využili větší rozsah napětí baterie, napájecí napětí pro všechny integrované obvody bylo zvoleno právě 3.0V. Napětí je nižší než standardní nominální napětí CMOS logiky 3.3V, nicméně leží bezpečně ve jmenovitém rozsahu napájení všech obvodů. Při vhodném výběru spínaných step-down či lineárních LDO regulátorů lze bezpečně tohoto regulovaného napětí dosáhnout pokud je napětí na článku v udaném rozsahu. Všechny napájecí vstupy integrovaných obvodů jsou opatřeny blokovacím kapacitorem a v místech, kde je to vhodné, filtračním induktorem. Specialitou je pak napájení mikroprocesorů řídicích motory. Ty jsou napájené přímo ze silového rozvodu baterie, kvůli budícím úrovním spínacích tranzistorů. Komunikační sběrnice je připojena k těmto mikroprocesorům skrz předřadné rezistory kvůli omezení rušení vlivem rozdílných úrovní zemního potenciálu.

Elektrické stínění a parazitní odpory vodivých cest

U zařízení tohoto typu, kde jsou v těsné blízkosti citlivé senzory, analogové cesty se slabými signály a výkonové elementy pracující s velkými proudy na vysokých frekvencích je třeba klást velký důraz na nežádoucí vlivy odporů vodivých cest. Při návrhu bylo důsledně dodrženo oddělení zemních ploch a vodičů s proudy do motorů tak, aby byly proudové cesty jasně vymezeny. V případě řídicí jednotky i nosné platformy je zemní potenciál propojen se silovým zemním vodičem pouze v místě konektoru mezi nimi.

Analogové cesty

Analogové cesty jsou vždy vedeny tak, aby byly vhodně stíněné od silových vodičů či okolního rušení. Kde je to možné, jsou signálové cesty „uzavřeny“ ve prostředních vrstvách tištěného spoje mezi zemními plochami na vrchní a spodní straně. Veškeré signály vedené na větší vzdálenosti jsou diferenciální. Referenční vodič je společný pro všechny senzory (ultrazvuk).

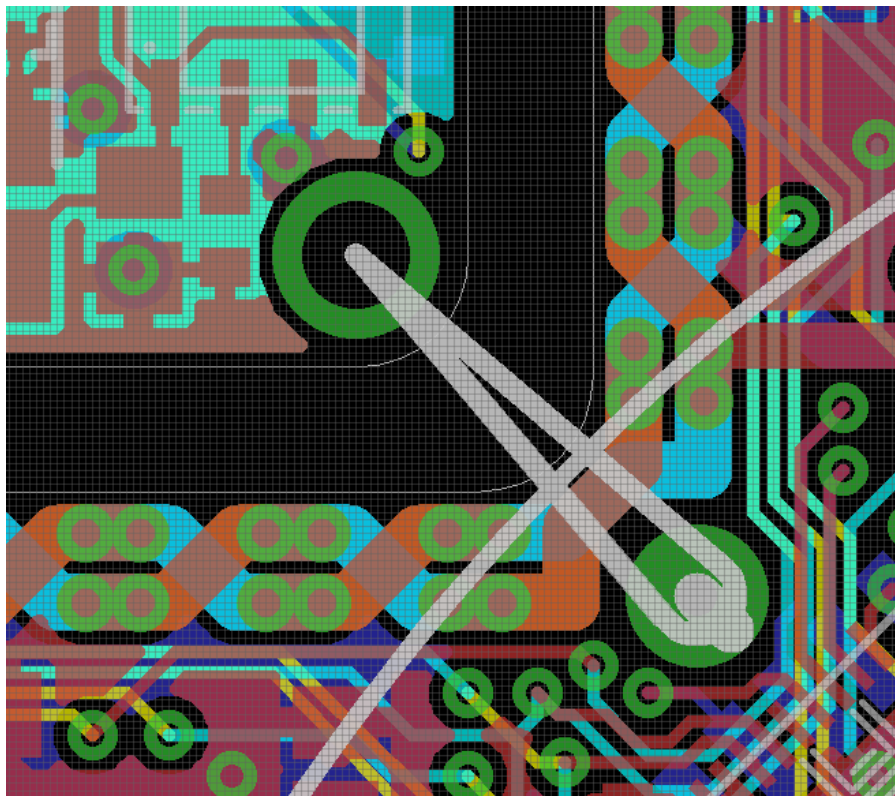
Antény

Na řídicí jednotce jsou umístěny dvě keramické SMD antény (pro GPS a ShockBurst) v odpovídajícím frekvenčním pásmu. Okolo antén bylo na DPS ponecháno co možná největší místo bez signálových cest a zemních ploch. Také citlivé senzory byly umístěny co nejdále od vysílací antény (ShockBurst).

Silový rozvod a magnetické stínění

Magnetické pole vzniklé elektrickým proudem napájecím motory může být v blízkosti magnetometru srovnatelné s polem geomagnetickým. Z tohoto důvodu je nutné oba dva silové vodiče napájecí

motory umístit co nejbliže u sebe tak, aby plocha obtékaná proudem byla co nejmenší. Na nosné platformě je kruhový rozvod navíc vylepšen „výpletem“, tedy analogií kroucené dvojlinky. Magnetické indukční toky generované v jednotlivých okách spirály se navzájem vyruší a dojde tak k většímu potlačení interferenčního magnetického pole. Tam, kde je to možné, jsou kvůli minimalizaci odporu silových cest prokládaně použity všechny čtyři vrstvy DPS.



Kroucené silové vodiče, nosná platforma

Řídící jednotka

Jádrem řídicí jednotky a celého stroje je mikroprocesor architektury ARM Cortex-M4.

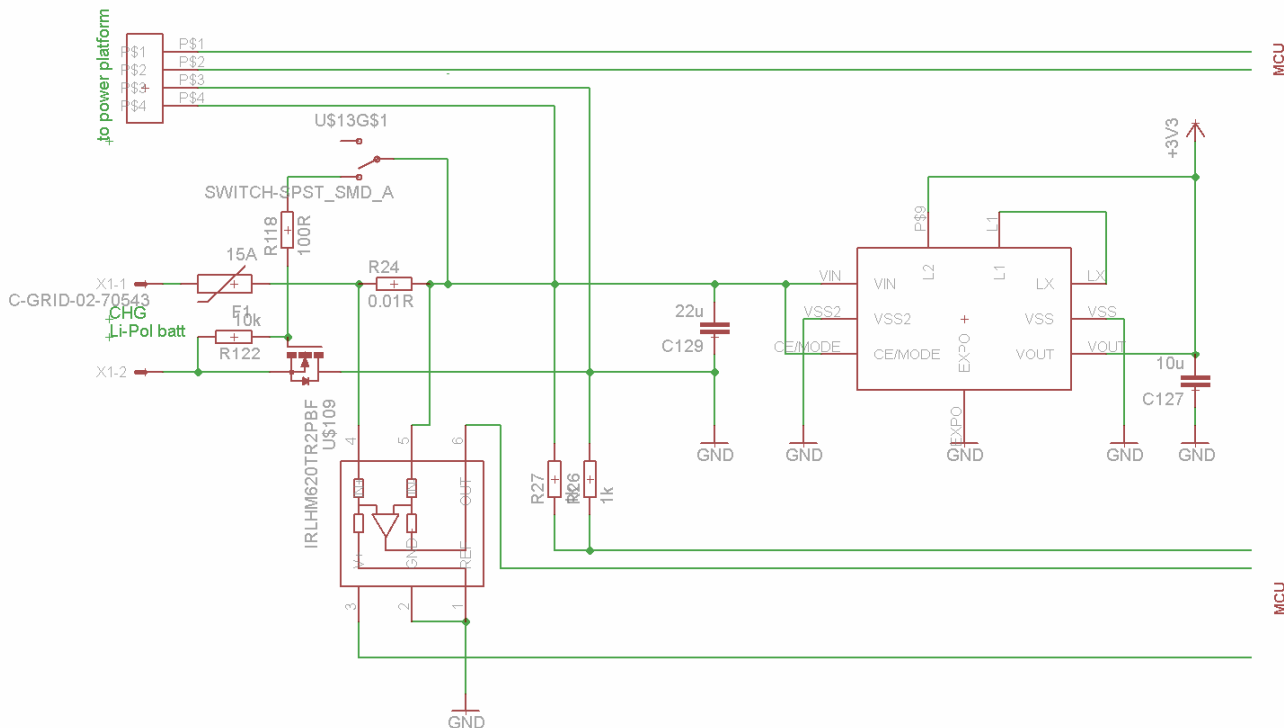
Elektrické subsystemy

1. Distribuce napájení a měření baterie
2. Planetární a inerciální senzory
3. GPS
4. Radiový komunikační modul
5. Slot pro mikro-SD kartu
6. Modul aktuátoru
7. Vysílač horizontálního sonaru

1. Distribuce napájení a měření baterie

Svorky baterie jsou trvale připájeny na vstupní piny řídicí jednotky X1-1 a X1-2. Piny jsou na horní straně osazené konektorem pro dobíjení článku. Celé zařízení je chráněno proti zkratu SMD pojistkou

F1. K přerušení globálního napájení (záporný vodič) slouží N-kanálový FET tranzistor U\$109. Tranzistor vykazuje mnohem menší hmotnost, rozměry a ztrátový odpor ve srovnání s mechanickým spínačem potřebných parametrů. Brána tranzistoru je ovládána miniaturním přepínačem U\$13G\$1, který tedy slouží jako hlavní, manuální vypínač ON/OFF pro celé zařízení.



Napájení na řídicí jednotce

K měření proudu je použit měřicí rezistor R24. Úbytek napětí na tomto rezistoru je měřen specializovaným obvodem INA213, který tento převádí na napětí vzhledem k referenci (zemi). Jeho výstup je připojen na jeden ze vstupních pinů vestavěného ADC v mikroprocesoru STM32F405. K měření napětí slouží odporový dělič tvořený rezistory R26 a R27. Jeho výstup je rovněž připojen na jeden ze vstupních pinů vestavěného ADC v mikroprocesoru STM32F405.

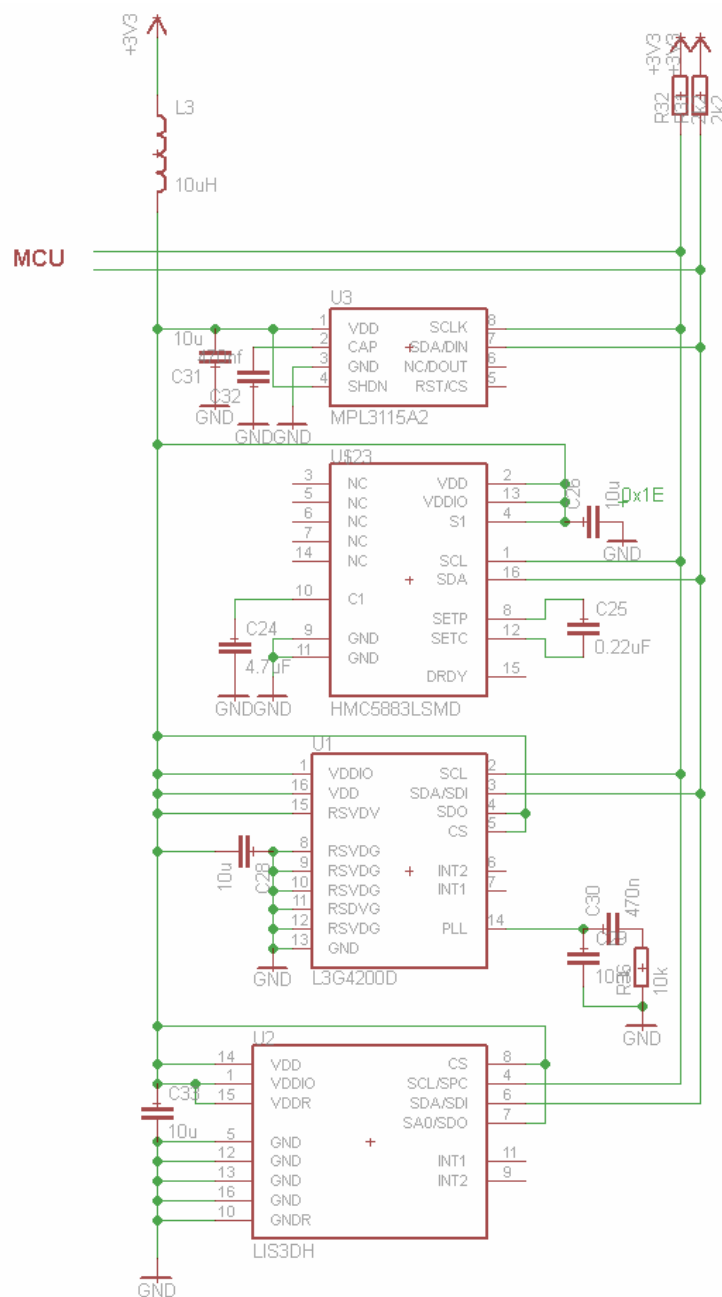
Vzhledem k vyššímu odběru komponent na řídicí jednotce (až 300mA) byl zde použit spínaný (step-down) regulátor s integrovaným induktorem XCL206B303AR-G.

2. Planetární a inerciální senzory

Jedná se o jednočipové senzory s vestavěným AD převodníkem umístěny na řídicí jednotce kvůli odstínění vibrací z motorů. *Akcelerometr*, *magnetometr* a *gyro* mají poskytovat základní měření pro odhad orientace stroje. Odhad orientace je základem pro správnou funkci dynamického letového regulátoru. Absolutní tlakoměr může sloužit k odhadu výšky nad mořem. Senzory, a hlavně magnetometr, byly záměrně umístěny do co možná největší vzdálenosti od silových vodičů a od antény bezdrátové komunikace. Přímo pod magnetometrem se nachází kovový kryt mikro-SD slotu, který by mohl pomoci odstínit magnetické pole generované samotným lithiovým článkem. Konkrétní modely byly pečlivě vybrány s ohledem na jejich cenu a vlastnosti:

- 3D gyro (L3G4200D)
- 3D accelerometer (LIS3DH)
- 3D magnetometer (HMC5883)
- Tlakoměr (MPL3115A2)

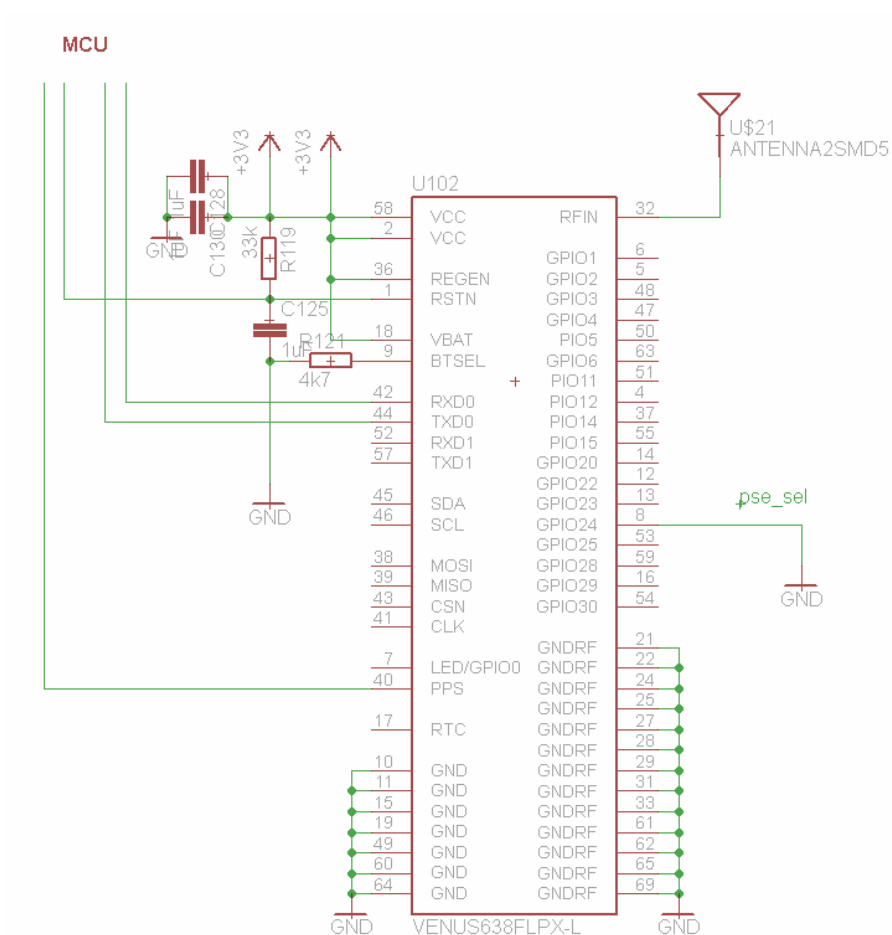
Pokud budou však shledány jako nevhodné, je možné v příští verzi zvolit ekvivalenty. Všechny senzory jsou připojeny na **vyhrazenou I2C sběrnici** centrálního mikroprocesoru. Vyhrazená sběrnice byla použita z důvodu větší priority těchto senzorů a jejich uplatnění v rychlých smyčkách stabilizujícího letového regulátoru. Přídavné signály, jako je například přerušení na určitou událost (např. detekce volného pádu) nejsou zapojeny, protože se předpokládá pouze kontinuální vzorkování všech senzorů se danou fixní periodou. Napájení senzorů je filtrováno předřazeným induktorem, který má za cíl zmírnit možné napěťové špičky spínaného zdroje a také rušení z digitálních obvodů.



Zapojení senzorů na řídicí jednotce

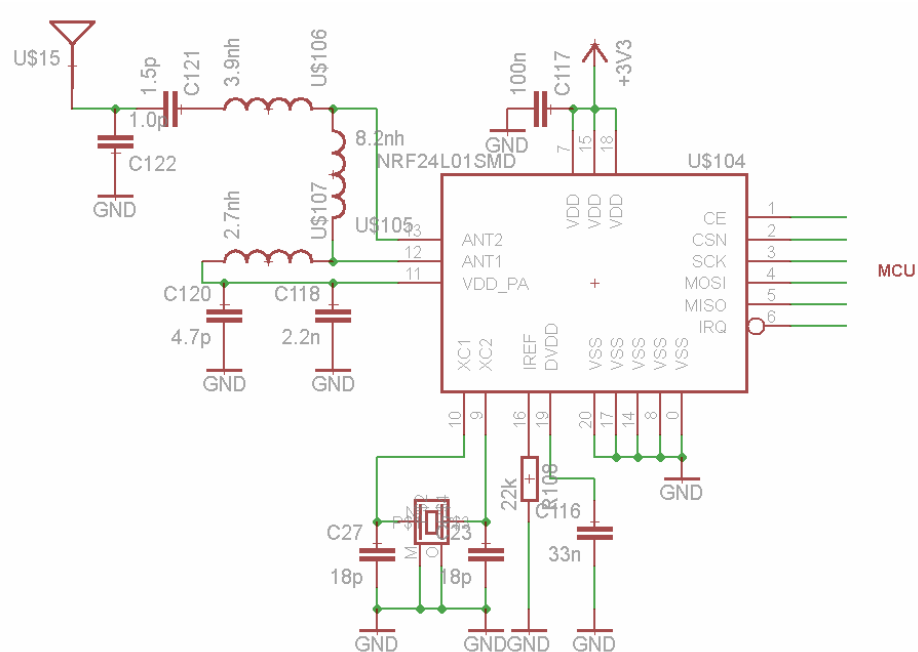
3.GPS

Obvod GPS, umístěný na řídicí jednotce, má za cíl poskytnout stroji měření absolutní polohy při venkovním použití. Jedná se o jednočipový systém VENUS638FLPX-L opatřený keramickou anténou, umístěnou na horní straně směrem k obloze. Obvod komunikuje s řídicím procesorem skrz vestavěný UART. Řídicí mikroprocesor může jednotku GPS resetovat pinem RSTN. Výstupní pin PPS funguje jako přesný globální sekundový impuls (s přesností 20ns) který by mohl sloužit například jako referenční hodinový signál pro vzájemnou lokalizaci.



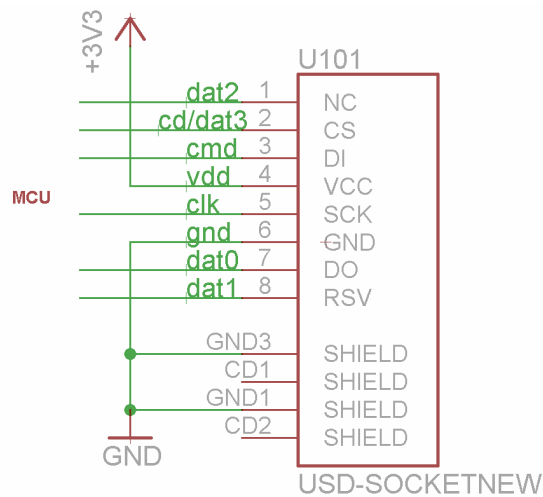
1. Bezdrátový komunikační modul

Jedná se o komunikační modul s nízkou latencí umožňující řízení, telemetrii, vzájemnou komunikaci a lokalizaci ale i například řízení rychlých smyček v reálném čase (s dynamickým regulátorem umístěným mimo palubu quadrotoru). K tomuto účelu slouží obvod NRF24L01 s keramickou anténou. Obvod je zapojen dle doporučení od výrobce. S řídicím mikroprocesorem komunikuje po sběrnici SPI a třemi dalšími příznakovými signály.



2. Slot pro mikro-SD kartu

Mikro-SD karta může sloužit jako palubní datové úložiště pro nejrůznější účely. Karta je připojena k hlavnímu mikroprocesoru skrz rychlé SDIO rozhraní.



Nosná platforma

Elektrické subsystémy

1. Distribuce napájení
2. Modul aktuátoru
3. Vertikální ultrazvukový dálkoměr
4. Vertikální infračervený dálkoměr

5. Kamera
6. Horizontální sonar

1. Distribuce napájení

Na nosné platformě jsou vhodně rozmístěné LDO regulátory poskytující více úrovní napájecích napětí potřebných pro tam umístěné subsystemy. Silové vedení je důsledně odděleno od zemnicího vodiče kvůli eliminaci vlivu indukce a odporu vodivých cest.

2. Modul aktuátoru

Pohonný systém nosné platformy tvoří čtyři bezkartáčkové synchronní třífázové motory s přímým náhonem na vrtuli. Motory mají vnitřní společný „střed“ a vyvedené koncové fázové vodiče.

Motory jsou řízené elektronickým komutátorem s bezsenzorickým měřením polohy rotoru. Měření polohy je realizováno pomocí měření zpětné indukce motoru, konkrétně metodou „synchronního vzorkování“, tedy indukované napětí je na volné fázi vzorkováno vždy synchronně se spínací frekvencí PWM. K měření slouží interní napěťový komparátor vestavěný v mikroprocesoru ATMEGA168. Rezistorový dělič (R43, R43, R44 na obrázku) vytváří virtuální „střed“, zapojený na negativní vstup interního komparátoru. Jednotlivé fáze jsou potom přivedeny na vstupy interního analogového multiplexeru, jehož výstup je uvnitř procesoru připojen na pozitivní vstup komparátoru.

Každá fáze je řízena komplementární dvojicí výkonových MOSFET tranzistorů v jednom pouzdru (NTHD3102C). Tranzistory jsou buzeny přímo z mikroprocesoru ATMEGA168, který je pro tento účel napájen přímo ze silového napájení, což díky absenci budičů velmi výrazně zjednodušuje celý design. Parametry tranzistorů splňují proudové požadavky aplikace a zároveň vykazují dostatečně nízkou vstupní kapacitu pro přímé buzení piny mikroprocesoru.

Spínací tranzistory jsou blokovány třemi keramickými kondenzátory s vysokou kapacitou a napájení mikroprocesoru je filtrováno předřadným induktorem kvůli omezení napěťových fluktuací vznikajících spínací frekvencí tranzistorů.

Mikroprocesor je připojen na společnou komunikační sběrnici I2C skrz předřadné rezistory, kvůli omezení rušení vlivem rozdílných zemnicích potenciálů. Jako zdroj hodinového signálu pro mikroprocesor může být použit vestavěný oscilátor, nebo externí hodinový signál, generovaný mikroprocesorem rovinného sonaru. Tento signál je společný pro všechny čtyři aktuátory a rovněž opatřen předřadným rezistorem. Společný hodinový signál má sloužit pro fázovou synchronizaci PWM signálu s fází ultrazvuku tak, aby bylo možné rušivou PWM frekvenci z ultrazvukových senzorů lépe odfiltrvat.

