

Bakalářská práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra řídicí techniky

Elektronická část malé satelitní platformy

Jan Štěpán

Vedoucí: doc. Ing. Pavel Pačes, Ph.D.

Obor: Kybernetika a robotika

Studijní program: Systémy a řízení

Leden 2018

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Štěpán** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **420269**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra řídicí techniky**
Studijní program: **Kybernetika a robotika**
Studijní obor: **Systemy a řízení**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Elektronická část Malé satelitní platformy

Název bakalářské práce anglicky:

Small Satellite Platform Electronics

Pokyny pro vypracování:

1. Upravte existující elektroniku používanou pro řízení Malé satelitní platformy.
2. Navrhněte, realizujte a otestujte zapojení vnitřní elektroniky, která je postavená pomocí vývojových desek.
3. Navrhněte řešení, které bude využívat max. dvou vzájemně propojených desek.
4. Minimalizujte počet vnitřních vodičů nutných pro propojení jednotlivých součástí.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Emidio Marchitto, Small Satellite Platform For Illustrating Principles Of Spacecraft Stabilization, 2012, CVUT
[2] Vedral, J.; Fischer, J., ?Elektronické obvody pro měřicí techniku,? Vydavatelství ČVUT, Praha 1999, vydání 2., 340 s., ISBN 80-01-02966-2.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

doc. Ing. Pavel Pačes Ph.D., 13138

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **09.01.2017**

Termín odevzdání bakalářské práce: _____

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2018**

Podpis vedoucí(ho) práce

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování

Zejména bych chtěl poděkovat svému vedoucímu práce doc. Pavlu Pačesovi. Poděkování patří také mé rodině za morální podporu při psaní textu.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze, dne 9. ledna 2018

Abstrakt

Tato práce popisuje návrh a realizaci nové verze elektroniky Malé satelitní platformy, což je zařízení používané k demonstraci principů stabilizace družic. Konkrétně je zde použit princip využívající reakční kola. Pro účely zpětnovazebního řízení je jejich rychlost měřena pomocí optického senzoru. Protože je ale snímaný signál ovlivněn okolním osvětlením, je v rámci práce je tedy navržen obvod, který vzniklý offset odstraňuje. Původně složitý způsob propojení jednotlivých součástí elektroniky platformy je zjednodušen a dále je navržena a zrealizována nová deska plošného spoje.

Klíčová slova: stabilizace družic, řízení orientace leteckých prostředků, reakční kolo, optická měření, odstranění stejnosměrné složky, návrh DPS

Vedoucí: doc. Ing. Pavel Pačes, Ph.D.
Katedra počítačů, E-434

Abstract

This thesis describes a new version of the Small Sattelite Platform electronics, its design and realisation. The platform is a device used to demonstrate spacecraft stabilization principles. Specifically, it is a reaction wheel principle, that this platform introduces. An feedback loop is used to control the wheel rotation and its speed is measured using an optical sensor. Since the measued signal is affected by ambient light an circuit for removal of this offset is designed in this thesis. Previous complex interconnection of modules of the platform electronics is simplified, an new printed circuit board is designed and then realised.

Keywords: spacecraft stabilization, attitude control, reaction wheel, optical mesurement, DC component removal, PCB design

Title translation: Small Satellite Platform Electronics

Obsah

Úvod	1	2.4 Použitý návrhový software	19
Část I		3 Návrh desky s budičem motorů	21
Teoretická část		3.1 Zdroj napájení reakčních kol . . .	21
1 Principy stabilizace družic	5	3.1.1 Spínaný zdroj obecně	21
1.1 Obecné principy stabilizace družic	5	3.1.2 Popis použitého obvodu	23
1.2 Reakční kola	6	3.1.3 Realizace na DPS	25
1.2.1 Řízení rychlosti otáčení	6	3.2 Budič motorů	25
1.3 Inerciální měřicí jednotka	7	3.2.1 Návrh budiče motorů	26
1.3.1 Gimbaled inertial platform . . .	8	3.2.2 Ladění prototypu budiče	26
1.3.2 Strapdown system	8	3.2.3 Finální verze návrhu	28
1.4 StarTracker	8	4 Návrh desky s procesorem	29
Část II		4.1 Zdroj napájení procesoru	29
Praktická část		4.2 Mikroprocesor	30
2 Rozbor zapojení a návrh realizace	13	4.2.1 Oscilátor	30
2.1 Mechanické uspořádání platformy	13	4.2.2 Signalizační diody	31
2.2 Zapojení platformy	15	4.3 Moduly IMU a Wi-Fi	32
2.2.1 Zhodnocení původního zapojení	15	4.4 Modul pro měření rychlosti otáčení reakčních kol	32
2.2.2 Návrh nového zapojení	16	4.4.1 Testovací signál simulující snímání rychlosti otáčení	33
2.2.3 Napájení jednotlivých modulů platformy	18	4.4.2 Obvod pro odstranění stejnosměrné složky	33
2.3 Modul pro měření rychlosti otáčení reakčních kol	18	4.4.3 Úpravy převzatého zapojení	33
		4.4.4 Komparátor s hysterezí	35
		4.4.5 Finální realizace obvodu	36

4.5 Úpravy modulu pro StarTracker	38
5 Zhodnocení	39
5.1 Splnění zadání bakalářské práce	40
5.2 Zhodnocení prototypu zařízení .	41
5.3 Zhodnocení finálního zařízení . . .	42
5.3.1 Návrh spínaného zdroje	42
5.3.2 Rozvedení napájení	42
5.3.3 Mechanická odolnost	43
5.4 Zhodnocení funkčnosti zařízení .	44
5.4.1 Zdroje napětí	44
5.4.2 Budič reakčních kol	44
5.4.3 Obvod pro měření rychlosti reakčních kol	44
5.5 Budoucí vývoj platformy	46
Závěr	47
Přílohy	
A Literatura	51
B Schémata zapojení	53

Obrázky

1.1 Metoda měření času [[2]]	7	3.6 Princip činnosti H-můstku.	25
1.2 Metoda měření frekvence [[2]]	7	3.7 Zapojení budiče motorů	27
1.3 Gimbaled Inertial Platform [[3]].. . . .	8	3.8 Testovací obvod pro ladění budiče motorů	28
1.4 Schéma zařízení Star-Tracker [4]	9	4.1 Schéma zdroje napájení procesoru	29
2.1 Schéma celého systému	13	4.2 Schéma zapojení procesoru	30
2.2 Schéma SSP	14	4.3 Způsob připojení oscilátoru [1].. . . .	31
2.3 Fotografie některých z původně použitých DPS platformy.	15	4.4 Schéma připojení oscilátoru k procesoru	31
2.4 Blokové schéma SSP	16	4.5 Porovnání generovaného signálu	33
2.5 Původní způsob zapojení procesoru [5]	17	4.6 Schéma obvodu pro snímání rychlosti otáčení [8]	34
2.6 Blokové schéma nového zapojení elektroniky platformy	17	4.7 Demonstrace zkreslení signálu po odstranění stejnosměrné složky	34
2.7 Způsob propojení DPS	17	4.8 Komparátor s hysterezí	35
2.8 Modul pro řízení otáčení reakčních kol [5]	19	4.9 Schéma detekčního obvodu frekvence otáčení	36
3.1 Princip činnosti "StepDown"zdroje [12]	22	4.10 Testovací obvod pro snímání stejnosměrné složky	37
3.2 Pravidla návrhu stepdown regulátoru na DPS [12]	23	4.11 Převod zkresleného signálu po odstranění stejnosměrné složky na logickou úroveň	37
3.3 Praktická aplikace spínaného zdroje	23	4.12 Připojení diod vytvářejících obrazec pro modul StarTracker	38
3.4 Zjednodušení schématu spínaného zdroje	24	5.1 Sestavený výrobek	39
3.5 Schéma zapojení zdroje napětí reakčních kol	24	5.2 Fotografie desky s budičem motorů	40
		5.3 Fotografie desky s procesorem	40

5.4 Fotografie prototypu zařízení . . .	41
5.5 Zhodnocení návrhu regulátoru spínaného zdroje	43
5.6 Rozvedení napájení na DPS s procesorem.	43
5.7 Tvar filtrovaného signálu z optického senzoru	45

Tabulky

3.1 Řízení spínání výstupního napětí H-můstku	26
3.2 Výsledky testování budiče motorů	28
4.1 Hodnoty rezistorů signalizačních diod procesoru	32
4.2 Výstup senzoru CNY70	33
4.3 Vyfiltrování stejnosměrné složky	35
4.4 Hodnoty rezistorů diod generujících obrazec pro modul StarTracker . . .	38



Úvod

Jako téma bakalářské práce jsme si vybral realizaci elektronické části Malé satelitní platformy. Konkrétně se jedná o upravení současného zapojení tak, aby vyhovovalo následujícím parametrům - jednoduchost, snadnost montáže platformy a malý rozměr finálního zařízení.

Malá satelitní platforma (Small Sattelite Platform, SSP) je zařízení určené k demonstraci základních principů stabilizace družic ve vesmíru. Konkrétně se jedná o řízení orientace pomocí reakčního kola s využitím buď relativního měřicího zařízení polohy - inerciální měřicí jednotky (IMU), nebo absolutního - navigace pomocí hvězdné mapy (StarTracker).

Dané téma jsem se rozhodl zpracovat zejména z toho důvodu, že mě zaujala možnost se lépe seznámit s návrhem a konstrukcí zařízení používaných ve vesmíru. Po tom, co jsem zjistil, že se v práci budu věnovat návrhu elektroniky, jsem byl také rád, že se po nabytí teoretického základu teorie obvodů mohu naučit získané poznatky využít v praxi. Musel jsem sice vynaložit více úsilí, než kdybych si vybral pouze softwarový projekt, ale věřím že mi tato práce umožnila více proniknout do principů fungování elektronických zařízení.



Část I

Teoretická část

Kapitola 1

Principy stabilizace družic

Malá satelitní platforma je zařízení demonstrující principy stabilizace družic. Pro uvedení do této problematiky je v této kapitole uveden stručný přehled těchto principů používaných v praxi.

1.1 Obecné principy stabilizace družic

Družice na oběžné dráze musí být stabilizována, to jest správným způsobem orientována v prostoru. Existují různé způsoby stabilizace, například jsou často používány pohony založené na principu raketového motoru. Jejich nevýhodou je ale nutnost mít zásoby paliva nebo vypouštěného plynu.

Jinou možností je použít reakční kola - tzv. *reaction wheels*, což jsou motory se setrvačníky, nebo tzv. *magnetorquer* - systém složený z magnetických cívek. Jejich výhodou je to, že neznečišťují okolní prostředí zplodinami, takže je jejich použití výhodné zejména pro družice na astronomická pozorování. Samotná družice totiž může také používat navigaci na principu StarTracker, který je náročný na čistotu okolního prostředí.

Systém "magnetorquer" lze použít pouze na nízké oběžné dráze, protože intenzita magnetického pole klesá ze vzdáleností od Země. Navíc se u něj při přechodu nad pólem, nebo rovníkem ztrácí možnost řízení kolem jedné z os. [6] Na vyšší oběžné dráze se tedy často používá systém reakčních kol, který je právě na této platformě demonstrován.

1.2 Reakční kola

Reakční kolo se skládá ze setrvačnicku, disku s velkým momentem setrvačnosti, a elektrického motoru, který je upevněn na kostře družice. Dle 3. Newtonova pohybového zákona - principu akce a reakce - k síle, která otáčí setrvačnickem existuje síla opačná, která způsobí, že se celá družice bude otáčet v opačném směru.

Pro stabilizaci družice ve třech osách by bylo možné použít tři setrvačnickové motory, nicméně v praxi se používají čtyři rozmístěné do čtyřstěnu [7]. Tato konfigurace reakčních kol nabízí další osu volnosti a tedy poskytuje redundanci a dále i to, že se dá měnit rychlost otáčení reakčního kola, aniž by došlo ke změně stability družice [7].

1.2.1 Řízení rychlosti otáčení

Pro zajištění možnosti se satelitem přesně manévrovat je nutné, aby rychlost otáčení reakčního kola byla velmi přesně regulována. K jejímu měření lze pak použít množství různých principů, z nichž některé jsou popsány v dalším textu.

V družicích se k měření rychlosti otáčení reakčního kola mohou použít magnetické senzory - například Hallova sonda. Aby bylo možné rychlost snímat, musí být daný setrvačnick k tomu účelu uzpůsoben, jeho povrch nesmí být homogenní. Například na něm mohou být vytvořeny magnetické značky, nebo může mít celý setrvačnick tvar ozubeného kola.

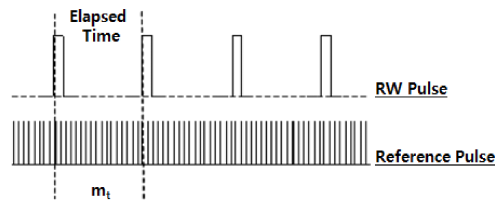
Na výstupu použitého senzoru potom naměříme řadu pulzů. Z nich lze údaj o rychlosti získat několika způsoby, z nichž lze popsat následující: (cituji [2])

■ Metoda měření času

Při použití této metody měříme po dobu trvání jednoho pulzu počet pulzů referenčního signálu, který má vyšší frekvenci, než frekvence otáčení kola. U malých rychlostí tento algoritmus umožňuje vysokou přesnost, nicméně u vyšších tato metoda selhává. Výslednou rychlost spočteme následujícím způsobem:

$$\omega(rpm) = \frac{60 \cdot f_r}{P \cdot m_t} \quad (1.1)$$

kde ω je rychlost otáčení v jednotkách rpm , f_r je referenční frekvence v Hz P je počet pulzů během jedno otočení kola a m_t je počet pulzů referenčního signálu za daný uplynulý čas.



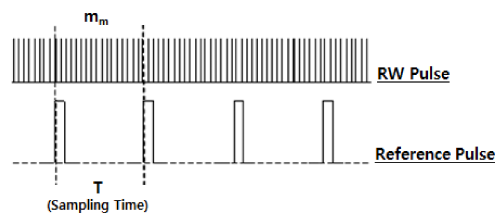
Obrázek 1.1: Metoda měření času [[2]]

■ Metoda měření frekvence

Tato metoda měří počet pulzů snímaného kola za daný časový interval. Na rozdíl metody měření času je zde počet referenčních pulzů menší než počet pulzů reakčního kola. Tento algoritmus lze na rozdíl od předchozího použít u vyšších rychlostí otáčení, protože u nízkých selhává. Výsledná rychlost se určí následujícím způsobem:

$$\omega(rpm) = \frac{60 \cdot m_m}{P \cdot T} \quad (1.2)$$

kde T je perioda referenčního signálu v sekundách, m_m je počet pulzů generovaný reakčním kolem za časový interval T a P je počet pulzů změřený během jednoho otočení kola.

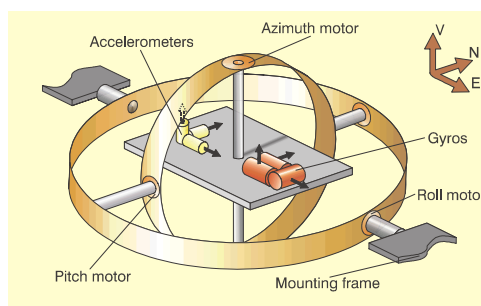


Obrázek 1.2: Metoda měření frekvence [[2]]

■ 1.3 Inerciální měřící jednotka

Inerciální měřící jednotka - Inertial Measurement Unit (IMU) je zařízení, které umí měřit úhlové zrychlení a případně i magnetické pole v okolí, a to pomocí kombinace akcelerometrů a gyroskopů, příp. magnetometrů. Postupnou integrací naměřeného zrychlení lze určit úhlovou rychlost a náklon v dané ose. Tuto hodnotu získanou v tzv. *body soustavě* daného zařízení přepočítáváme na hodnoty v tzv. *navigační soustavě*.

Tato jednotka používá k navigaci a řízení orientace v leteckých prostředcích, dále ji lze použít při krátkodobém výpadku GPS k určování polohy [3].



Obrázek 1.3: Gimbaled Inertial Platform [[3]]

1.3.1 Gimbaled inertial platform

Tento typ IMU se skládá z tří akcelerometrů a tří integračních gyroskopů (měřících náklon v jedné ose), umístěných na platformě zavěšené v Kardanově závěsu. Toto uložení zajišťuje, že orientace zavěšené platformy je zachovávána nezávisle na okolí. Z natočení úhlu jednotlivých ramen závěsu získáme přímo informace o úhlové poloze. Schéma je naznačeno na obrázku 1.3.

Obecně se jedná o mechanicky velmi komplexní zařízení, která vyžadují nelehkou údržbu, nicméně množství dopravních prostředků je stále nadále používá, například lze tento systém najít v letadle Boeing 747 [3].

1.3.2 Strapdown system

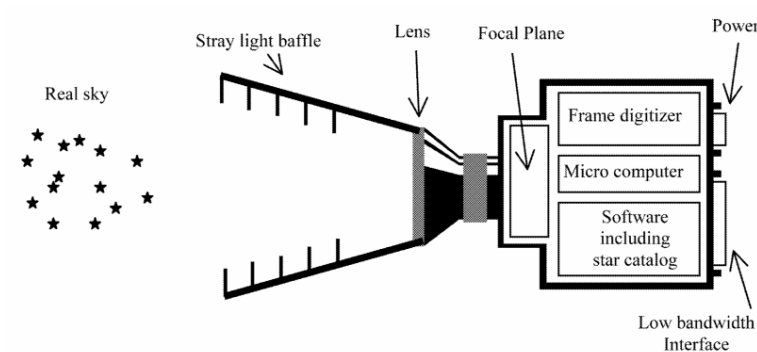
V tomto systému jsou senzory polohy umístěny přímo na kostře měřeného zařízení. To znamená, že před získáním informace o poloze je nutné nejprve provést transformaci souřadnic, na rozdíl od předchozího případu, kde se o převod stará samo mechanické uložení. [3] Tento způsob je použitý i na Malé satelitní platformě.

1.4 StarTracker

StarTracker se skládá z kamery a přidružené vyhodnocovací elektroniky. Ve firmware zařízení je uložen katalog hvězd, s kterým se porovnává hvězdná mapa získaná z kamery. Schéma zařízení je na obrázku 1.4.

Systém pracuje ve dvou režimech [4]:

- **Režim zjišťování orientace v prostoru.** Zařízení určí svoji polohu



Obrázek 1.4: Schéma zařízení Star-Tracker [4]

s využitím katalogu hvězd. Tímto způsobem je získána absolutní orientace vzhledem k navigační soustavě.

- **Sledovací režim.** Zde se porovnáváním snímaného obrazu s katalogem hvězd určuje aktuální odchylka od zamýšlené orientace družice, která je následně pohonným systémem kompenzována. Tímto způsobem je možné sledovat určitý bod v prostoru.

Podrobné informace o principu fungování tohoto zařízení lze nalézt v [4].



Část II

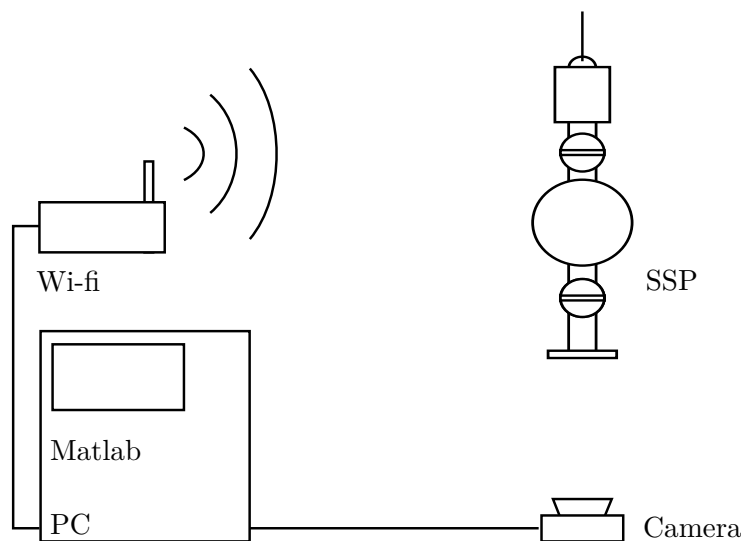
Praktická část

Kapitola 2

Rozbor zapojení a návrh realizace

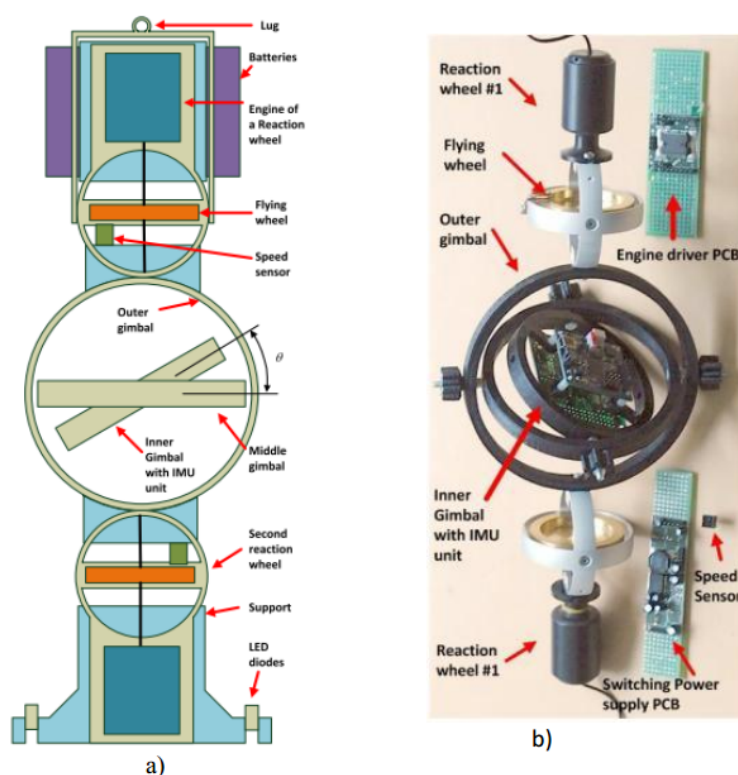
V první části této kapitoly je nejprve popsána struktura celé Malé satelitní platformy. Dále je provedena analýza původního zapojení elektroniky. Ve zbývajících částech je představeno nové mnou navržené zapojení, úpravy jednotlivých modulů platformy a popsána jejich realizace na desce plošného spoje.

2.1 Mechanické uspořádání platformy



Obrázek 2.1: Schéma celého systému

Malá satelitní platforma (Small Sattelite Platform - SSP) demonstruje řízení orientace reálného satelitu v prostoru. Celý systém se skládá ze samotného zařízení, počítače s řídicím programem v Matlabu, který platformu bezdrátově ovládá, a kamery připojené k tomuto počítači (obrázek 2.1).



Obrázek 2.2: Schéma malé satelitní platformy (nalevo) a zčásti sestavená platforma (napravo) [5]

Na SSP je demonstrována stabilizace družice v jedné ose tak, že je platforma zavěšena např. na stropu místnosti a s využitím reakčního kola je možné ovlivňovat její natočení v prostoru viz obrázek 2.1. Pro zajištění rovnoměrného působení momentů sil v celé platformě se používají dvě reakční kola, jedno v horní a druhé ve spodní části platformy.

Obě reakční kola jsou řízena pomocí zpětné vazby, jejich rychlost je měřena tak, že na setrvačnicku je připevněn papír s texturou, a optickým senzorem se detekuje polovina otáčky jako přechod mezi černou a bílou barvou.

Ve střední části se nachází řídicí elektronika celé platformy, tedy modul se zdrojem napětí, mikroprocesorem, budičem motorů a podpůrnými obvody k ovládání jednotlivých součástí platformy. Nachází se zde také dva samostatné výpočetní moduly - modul pro komunikaci s počítačem přes Wi-Fi a měřící jednotka IMU, jíž naměřená data jsou používána k demonstraci principu relativního způsobu řízení orientace.

Součástí platformy je též systém na demonstraci principu StarTracker, který je zde na rozdíl od systému popsaném v sekci 1.4 použit v inverzním módu. Na spodní části platformy jsou rozmístěny čtyři LED diody, které jsou používány k emulaci pole hvězd. Pod platformou na podlaze je pak umístěna kamera

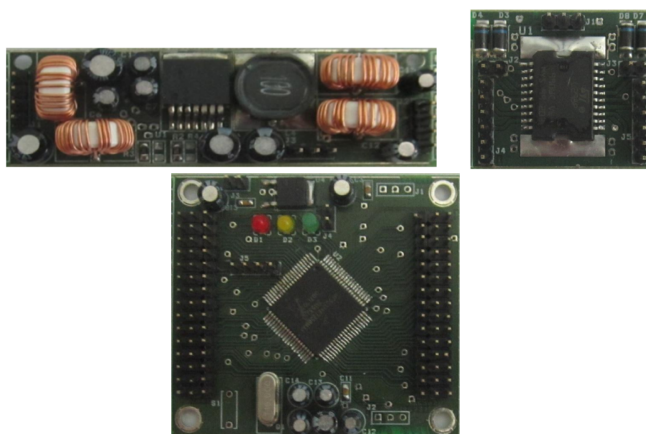
připojená k počítači, snímající obraz tohoto pole hvězd. V MATLABu se pak s využitím algoritmů pro zpracování obrazu ze nasnímaných obrazových dat posléze vypočte úhel natočení, který je používán při demonstraci absolutního způsobu řízení orientace.

Podrobnější informace o jednotlivých součástech lze nalézt v [5].

2.2 Zapojení platformy

2.2.1 Zhodnocení původního zapojení

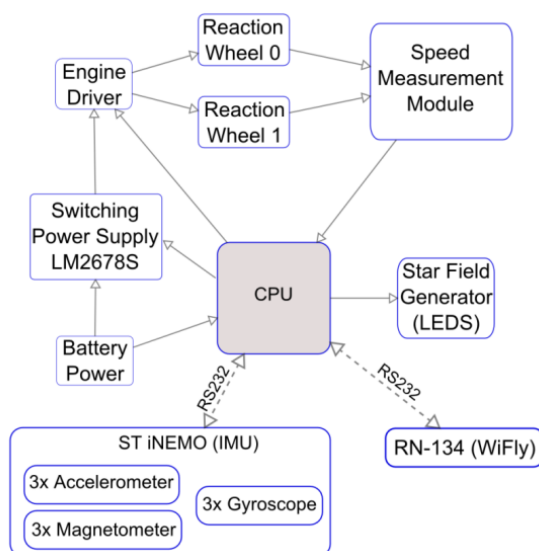
Původní zapojení SPP se skládalo z množství propojených desek plošných spojů, kde každá z nich byla univerzálním modulem.



Obrázek 2.3: Fotografie některých z původně použitých DPS platformy.

Původní zapojení je možné si prohlédnout na obrázku 2.4. Skládalo se z následujících desek plošných spojů pro každý modul:

- mikroprocesor
- univerzální zdroj napětí
- budič motorů reakčních kol
- modul s podpůrnými obvody pro LED diody StarTrackeru
- modul pro snímání rychlosti otáčení reakčního kola
- modul měřící jednotky IMU
- modul pro komunikaci přes Wi-Fi



Obrázek 2.4: Blokové schéma Malé satelitní platformy.

V původní verzi elektroniky byl každý z jednotlivých bloků na samostatné DPS.

Použití způsob měl sice výhodu jednoduché úpravy stávajícího zapojení nebo výměny některého z modulů, ale proces sestavení celé platformy byl velmi zdoluhavý. Množství používaných vodičů dávalo velký prostor chybám při propojování jednotlivých součástí. Příkladem může být deska s procesorem na obrázku 2.5.

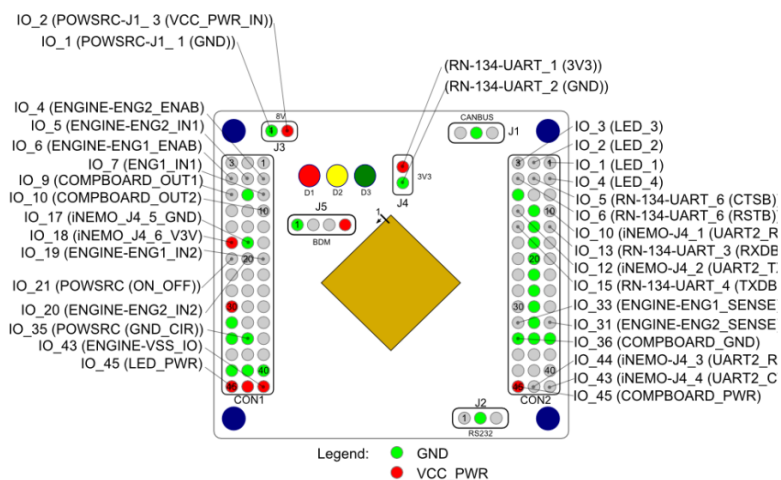
2.2.2 Návrh nového zapojení

Nová elektronika platformy se bude skládat z dvou desek, obsahující všechny moduly platformy, včetně IMU. Nejprve jsem uvažoval o možnosti použít pouze jednu desku, nicméně jsem se po zhodnocení zapojení a uvážení prostorového rozmístění součástí; rozhodl použít dvě desky stejné velikosti nasazené na sebe propojením pomocí dvou pinových lišt (obrázek 2.7).

Tím navíc dojde k oddělení silové části - obvodů pro řízení motorů - a řídicí části - desky s procesorem. Jak jsem již naznačil, desky budou propojeny dvěma konektory, jeden z nich se používá pro signály řízení motorů a druhý pro napájení.

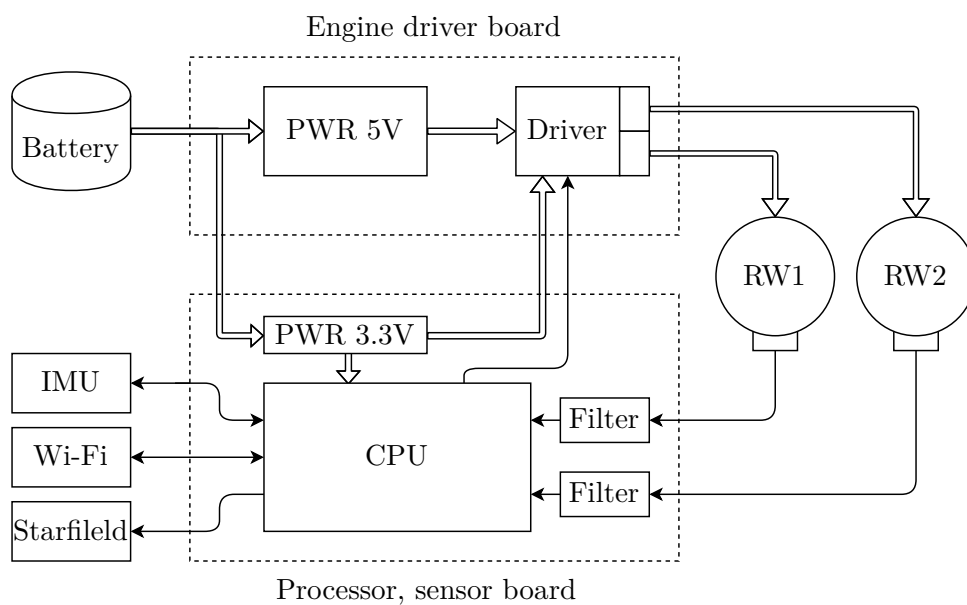
Na obrázku 2.6 je představeno navrhované schéma platformy. Jednotlivé moduly platformy jsou na deskách rozmístěny následujícím způsobem:

- Deska s budičem motorů
 - Zdroj silového napětí

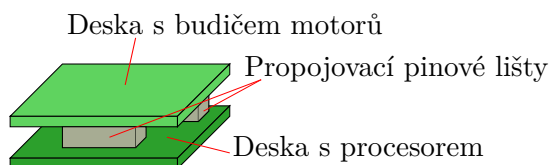


Obrázek 2.5: Původní způsob zapojení procesoru [5].

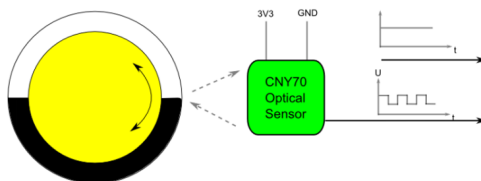
Na každý ze samostatných pinů byla připojena jedna propojka, připojení jednotlivých zařízení k procesoru nemá logické uspořádání. Dále je patrné že množství pinů zůstalo pro účely SSP nevyužito.



Obrázek 2.6: Blokové schéma nového zapojení elektroniky platformy



Obrázek 2.7: Způsob propojení DPS



Obrázek 2.8: Modul pro řízení otáčení reakčních kol [5]

V této práci tedy bude tento obvod vylepšen o odstranění stejnosměrné složky, čímž se eliminuje závislost na okolním osvětlení.

2.4 Použitý návrhový software

Návrh desek plošných původní varianty platformy byl proveden v návrhovém prostředí OrCAD. Ačkoli je tento nástroj v oblasti návrhu DPS široce používán, jedná se o komerční software. Projekt platformy je ale koncipován jako jednoduché, cenově dostupné zařízení, jehož návrhová schémata lze lehce dále upravovat. Z toho důvodu bylo pro návrh vybráno prostředí KiCAD, které ačkoli nemá tolik funkcionalit jako OrCAD, je pro začátečníky mnohem uživatelsky přívětivější a navíc je open-source a freeware.

Kapitola 3

Návrh desky s budičem motorů

Tato kapitola popisuje návrh jednotlivých modulů desky s budičem motorů.

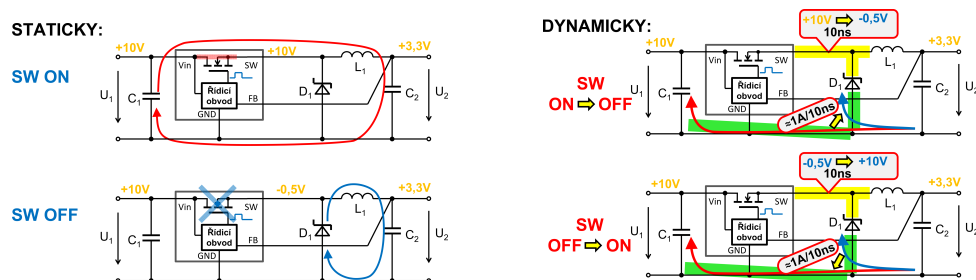
3.1 Zdroj napájení reakčních kol

Prvním samostatným modulem desky s budičem motorů je zdroj silového napětí. Jak bylo již v části 2.2.1 zmíněno, tak se v původní verzi zapojení elektroniky platformy nacházel na samostatné desce.

Protože se jedná o spínaný zdroj, tak nejprve o tomto obvodovém prvku uvedu několik teoretických poznatků a pravidel pro jeho realizaci na desce plošného spoje. Dále představím schéma spínaného zdroje, použitého v platformě a popíšu součástky, ze kterých se skládá. Nakonec představím jednotlivé kroky návrhu prototypu a dále finální desky plošného spoje.

3.1.1 Spínaný zdroj obecně

K vysvětlení principu funkce v platformě použitého spínaného zdroje lze využít schéma na obrázku 3.1. Jedná se o *DC/DC měnič*, konkrétně *Stepdown regulátor*, v literatuře někdy také označovaný jako *Positive (Negative) Buck Convertor*. Při realizaci spínaného zdroje je dále využita součástka obsahující řídicí logiku, ke které jsou připojeny externí prvky, definující parametry měniče, tedy cívka, kondenzátor a dioda (viz následující podkapitola, obrázek 3.3). Celé zapojení si lze představit jako zpětnovazební systém. V praxi se používají dva typy součástek, jedny výstup fixně nastaven na určitou úroveň napětí, u jiných je možné výstupní napětí spínaného zdroje nastavit pomocí děliče ve smyčce zpětné vazby.

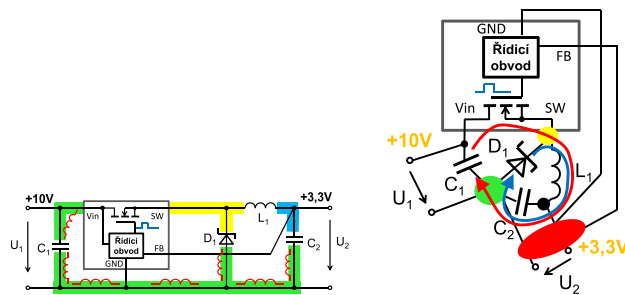


Obrázek 3.1: Princip činnosti "StepDown" zdroje. [12]

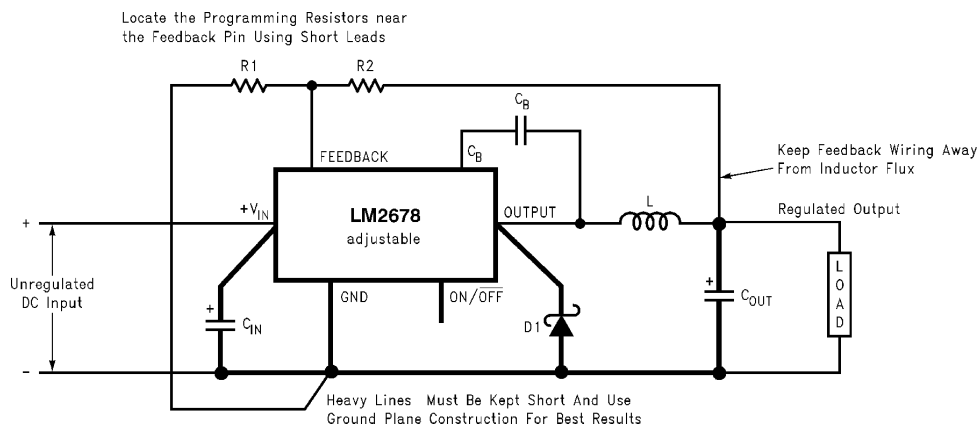
Ve stavu SW ON je obvod uzavřen, cívkou L1 teče proud a indukuje se na ní napětí. Proud Při přechodu do stavu SW OFF se toto napětí nemůže skokově změnit a proto je zde přítomna dioda D1, která druhou část obvodu uzavře. V opačném případě by totiž mohlo dojít k poškození spínací součástky. Řídící obvod mezi těmito dvěma stavy přepíná a tím ovlivňuje napětí přítomné na cívce L1. Výstup celého zařízení je ale na výstupním kondenzátoru C2, který mimo jiné ještě zajišťuje vyhlazení výstupního napětí. Jeho hodnota je řízena pomocí zpětné vazby řídicím obvodem ovlivňujícím rychlost přepínání mezi stavy SW ON a SW OFF.

Nejen parametry jednotlivých prvků obvodu, ale i rozmístění součástek na desce plošného spoje mohou ovlivnit přesnost výstupního napětí. Proto při návrhu layoutu desky plošného spoje je nutné dbát na několik pravidel, které pomáhají vylepšit elektromagnetickou kompatibilitu (EMC). V opačné případě by nemuselo dojít k dostatečnému vyhlazení výstupního napětí - vzniklo by velké zvlnění, což může v některých aplikacích vadit. Proto [12] doporučuje při návrhu využít následující pravidla (demonstrována na obrázku 3.2):

- V okolí zpětné vazby FB nesmí být žádné citlivé signálové spoje, protože by mohlo dojít k přeslechům a tím by se do řídicího obvodu dostala nekorektní informace o výstupním napětí a zpětnovazební řízení by přestalo fungovat.
- Je nutné minimalizovat parazitní indukčnosti vodičů. Když vezmeme, že indukčnost vodiče je 10nH/cm tak po 1 cm už může být rozdíl napětí teoreticky až 1V. [výpočet?] To zajistíme tak, že spoj GND musí být co nejkratší a výstupní svorka U2 musí být co nejblíže C2.
- Velikost ploch proudových smyček musí být co nejmenší. V optimálním případě by se neměla velikost proudové smyčky při sepnutém a rozepnutém spínači SW lišit. Toho můžeme dosáhnout tak, že využijeme trough-hole součástka a smyčku C1-L1-C2 vedeme na jedné a smyčku D1-L1-C2 na druhé straně dvoustranné desky plošného spoje.



Obrázek 3.2: Pravidla návrhu stepdown regulátoru na DPS. [12] Na levém obrázku je vidět schéma regulátoru a napravo jeho teoreticky nejlepší realizace z hlediska EMC. Je nutné minimalizovat parazitní indukčnosti vodičů (zvýrazněné zelenou barvou) a proto je zem stabilizátoru vhodné soustředit do jednoho bodu. Dále je potřeba mít co nejmenší velikost ploch proudových smyček, v optimálním případě by jejich rozložení na DPS mělo být podobné, což je na pravém obrázku znázorněno modrou a červenou šipkou

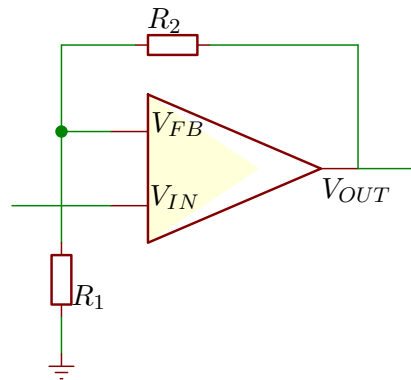


Obrázek 3.3: Praktická aplikace použité součástky spínaného zdroje. [9] Konkrétní zapojení zdroje napětí je v příloze B.

3.1.2 Popis použitého obvodu

V platformě použitý spínaný zdroj LM2678 (zobrazený na obrázku ??) byl z předchozí verze elektroniky platformy převzat prakticky beze změn. Jedná se o spínaný zdroj typu ADJ - adjustable, který umožňuje výstupní hodnotu napětí lze nastavit s využitím zpětnovazebních rezistorů, jak bylo dříve zmíněno. Tuto součástku jsem se v novém obvodu rozhodl zachovat, protože do budoucna umožňuje použití reakčních kol od jiného výrobce, která by měla specifikovanou jinou hodnotu napětí pro PWM řízení motorů.

Pro účely výpočtu hodnoty zpětnovazebních rezistorů si můžeme celý spínaný zdroj (se schématem na obrázku 3.3 představit jako neinvertující zesilovač s rezistory R_1 a R_2 ve zpětné vazbě, viz obrázek 3.4. Výstupní



Obrázek 3.4: Zjednodušení schématu spínaného zdroje

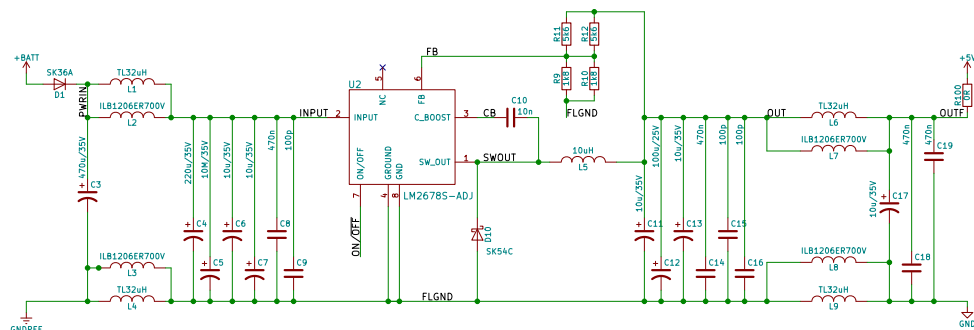
Pro účely výpočtu lze spínaný zdroj na obrázku zjednodušit jako zapojení neinverujícího zesilovače. [9]

hodnotu pak určíme podle následující vztahu:

$$V_{OUT} = V_{FB} \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) \quad (3.1)$$

kde V_{IN} je hodnota feedback voltage, typicky 1,21V. [9]

Schéma konkrétního zapojení je možné nalézt v příloze B. Na vstupu je použita dioda zabraňující poškození obvodu při převrácení polarity napájení. Dále je jak na vstupu, tak i na výstupu je stabilizátor oddělen filtračními kondenzátory a vzduchovými cívkami (TL32u), případně je možné použít i filtrační cívky (ILB) pro vyhlazení signálu (označení viz zmíněná příloha B). Na rozdíl od schématu na obrázku 3.3 jsou oba zpětnovazební odpory zapojeny jako paralelní zapojení dvou rezistorů. Je to z důvodu možnosti větší variability při nastavování výstupní hodnoty napětí (odpory jsou vyráběny v určitých standardních hodnotách).



Obrázek 3.5: Schéma zapojení zdroje napětí reakčních kol.

3.1.3 Realizace na DPS

I když jsem v předcházející části 3.1.1 zmínil určitá návrhová pravidla, tak jsem na ně při návrhu prototypu DPS ještě příliš nedbal a součástky pouze logicky uspořádal dle schématu. Ačkoli se sice žádné problémy neprojeví, tak jsem se posléze při návrhu finální verze platformy pokusil tato pravidla co nejlépe dodržet. Dále jsem oddělil výstup spínaného zdroje od budiče napětí rezistorem 0R, což usnadňuje ladění zařízení při ručním osazování.

Motory reakčních kol jsou navrženy na PWM řízení hodnotou 5V, které vytváří spínaný zdroj ze vstupního napětí 12V. Pro nastavení hodnoty výstupního napětí jsou potřeba zpětnovazební odpory příslušné hodnoty, které jsem vypočítal s využitím vztahu 3.1 a to tak, že jsem si z něj vyjádřil poměr R_1 ku R_2 :

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{V_{OUT}}{V_{FB}} - 1 \quad (3.2)$$

a tohoto poměru jsem se snažil kombinací dvou a dvou paralelně zapojených rezistorů $R_a = R_9 = R_{10}$ a $R_b = R_{11} = R_{12}$ dosáhnout. Vypočtené hodnoty odporů jsou následující:

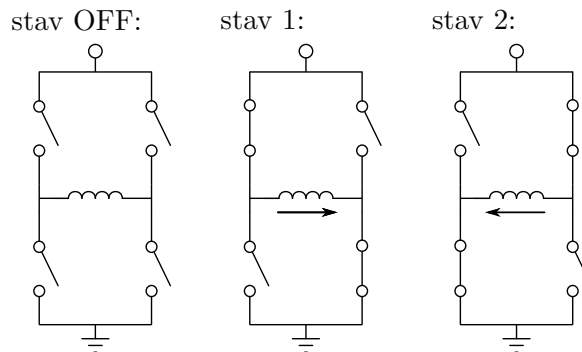
$$R_a = 1800\Omega$$

$$R_b = 5600\Omega$$

Teoreticky určená hodnota výstupního napětí spínaného zdroje je pak:

$$V_{OUT} = 4,9744$$

3.2 Budič motorů



Obrázek 3.6: Princip činnosti H-můstku.

Poznámka: U reálné součástky obsahuje každý spínač ochrannou diodu, která umožňuje tok proudu při jeho rozepnutí. V opačném případě by došlo k zničení spínací součástky

Rychlost a směr otáčení reakčních kol SSP jsou řízeny PWM modulací pomocí H-Můstku. Konkrétně je použit obvod *LM298P DualFullBridgeDriver*, což jsou dva samostatné H-Můstky na jednom čipu.

Princip fungování H-Můstku je obecně známý, viz obrázek 3.6, zjednodušeně kombinací logických signálů přivedených na tuto součástku můžeme řídit výstupní napětí, které může být $+V_{in}$, $-V_{in}$ nebo $0V$.

Podrobný popis principu PWM řízení reakčních kol je možné nalézt v [5]. Nicméně pro úplnost jsou v tabulce 3.1 uvedeny kombinace logických signálů, se kterými jsem pracoval v rámci pozdějšího testování zařízení.

no.	IN1	IN2	ENABLE	OUT
1	X	X	X	0
2	-	X	X	$-V_{OUT}$
3	X	-	X	V_{OUT}
4	-	-	X	0

Tabulka 3.1: Řízení spínání výstupního napětí H-můstku.

V tabulce je uvedeno jen několik vybraných kombinací logických úrovní, používaných pro účely PWM modulace. Signály *IN1* a *IN2* jsou použity k řízení polaroty výstupního napětí. Signál *ENABLE* řídí, zda je součástka vůbec aktivní. Symbol X znamená že daný pin je v logické úrovni HIGH.

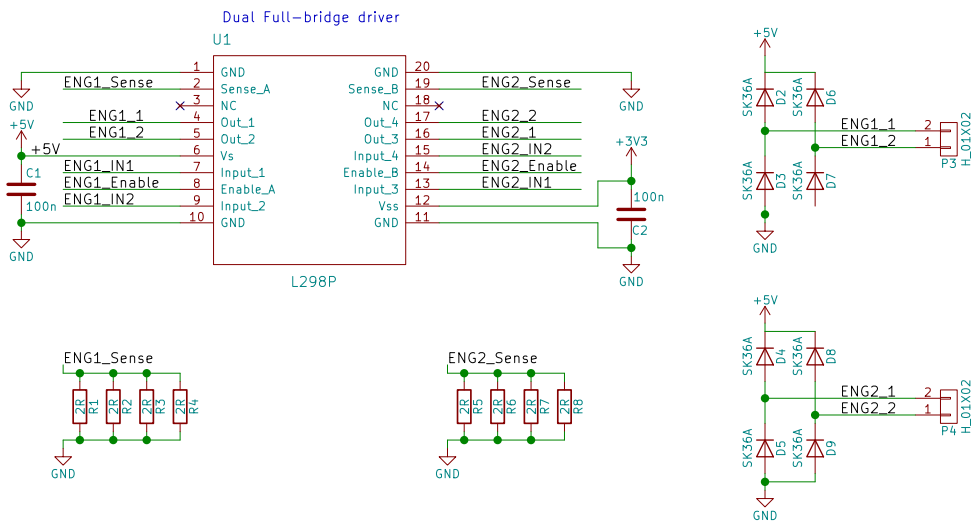
3.2.1 Návrh budiče motorů

Zapojení budiče motorů (viz obrázek 3.7) jsem stejně jako napájecí zdroj převzal z původního zapojení platformy. Součástka umožňuje řízení dvou motorů reakčních kol *ENG1* a *ENG2* napájecím napětím $5V$ generovaným spínaným zdrojem, popsáním v sekci 3.1. Řídící logika je $3,3V$, toto napětí je přivedeno ze stabilizátoru na druhé desce elektroniky SSP, který je popsán dále v sekci 4.1.

Při následném návrhu layoutu DPS jsem nicméně udělal zásadní návrhovou chybu, a to že jsem ke schématické značce diody přiřadil pouzdro, který mělo prohozené pořadí pinů a tím způsobil opačnou orientaci diody na DPS. Tato chyba mi zkomplikovala zprovoznění desky, jak je uvedeno v následující části. Dále jsem u některých součástí použil příliš malé pájecí plošky a tak jsem měl následně problém s jejich ručním osazováním.

3.2.2 Ladění prototypu budiče

Kromě výše uvedené chyby jsem navíc při ladění prototypu zapomněl aktivovat proudovou ochranu externího zdroje napájení. Zkrat způsobený obrácením



Obrázek 3.7: Zapojení budiče motorů.

Na napájecích vstupech obvodu jsou připojeny blokovací kondenzátory C_1 a C_2 . Diody připojené na výstupní piny jsou zde přítomny k omezení špiček při přepnutí spínačů. Na pinech *SENSE* je připojena zátěž $0,5\Omega$ - měřící rezistory - tyto piny je možné použít k měření proudu procházejícího zátěží.

orientace diod pak způsobil přehřátí budiče motorů a jeho poškození. Nicméně mi trvalo delší dobu, než jsem toto odhalil, protože jsem se domníval, že vzniklý zkrat byl způsoben pouze chybou při osazování součástek.

Budič motorů jsem ladil s využitím testovacího obvodu (na obrázku 3.8), neboť jsem v té době ještě neměl funkční desku s procesorem.

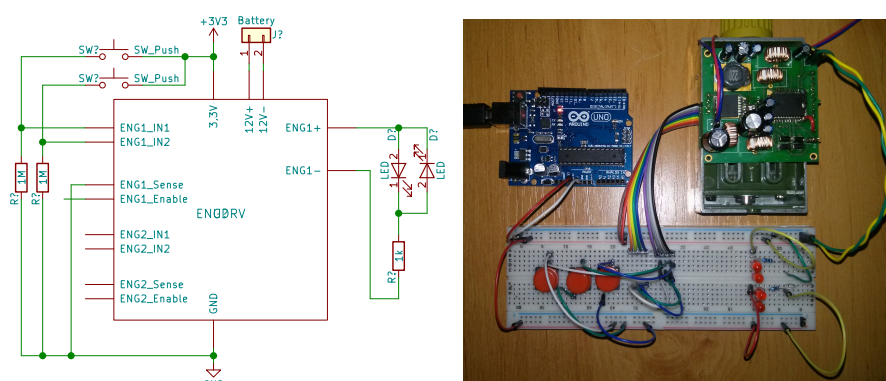
Odhalení problému mi ztížila další návrhová chyba, a to, že zem 3V3 logiky přivedené z druhé desky elektroniky platformy nebyla propojena se zemí budiče motorů. Nedošlo tedy k uzavření proudové smyčky a řídicí logický signál tedy nemohl vzniknout.

V rámci testování jsem postupně vyzkoušel jednotlivé kombinace logických úrovní pro řízení motoru. Zjistil jsem, že jedna z nich nefunguje a navíc při ní dochází k aktivaci proudové ochrany zdroje napětí. Konkrétně šlo kombinaci č.2 dle tabulky 3.1 na výstupu pro druhý motor (*ENG2_OUT*).

Zkusil jsem tedy změřit hodnotu napětí na jednotlivých pinech v situaci, kdy do budiče motorů neposílám žádný řídicí signál, viz tabulka 3.2.

Změřená úroveň napětí na pinu *ENG2_IN2* může znamenat to, že se přehřátím součástky uvnitř vytvořilo vodivé spojení, které způsobí napětí na tomto pinu, a navíc sepnutí této kombinace vytvoří zkrat v obvodu.

Tím jsem tedy ověřil, že součástka byla opravdu poškozená a bylo nutné ji



Obrázek 3.8: Testovací obvod pro ladění budiče motorů sestavený na nepájevém kontaktním poli.

Pro rozlišení směru otáčení motoru jsou využity dvě paralelně zapojené led diody. Deska *Arduino* je zde použita pouze jako zdroj 3V3 napájení, původně jsem chtěl k simulaci kombinace řídicích logických úrovní použít speciální program, ale nakonec jsem k tomuto účelu použil jednoduché mechanické spínače.

	IN1	IN2	ENABLE
ENG1	0	0	0
ENG2	0	-1,684	0

Tabulka 3.2: Výsledky testování budiče motorů

vyměnit. Po provedení opravy již celá deska plošného spoje začala fungovat korektně.

3.2.3 Finální verze návrhu

V rámci vývoje prototypu bylo na desce s procesorem nalezeno množství chyb, které bylo nutné opravit a nechat vyrobit desku novou (podrobnosti v následujícím textu). Ačkoli byl prototyp desky s budičem motorů po vyladění plně funkční, tak jsem se přece rozhodl vytvořit v rámci návrhu nové desky s procesorem odstranit chyby, které byly na desce s budičem motorů. Konkrétně se jedná o přidání propojení zemí 3V3 logiky a součástky budiče motorů, opravení pouzder součástek a optimalizace jejich rozmístění na desce plošného spoje pro usnadnění ručního osazování.

Kapitola 4

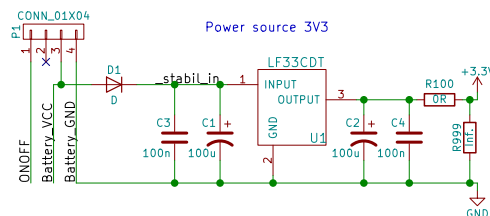
Návrh desky s procesorem

Tato kapitola popisuje návrh jednotlivých modulů desky s procesorem.

4.1 Zdroj napájení procesoru

Součástky na desce s procesorem používají napětí 3.3V, které je vytvářeno regulátorem *LF33CDT*. Schéma jeho zapojení 4.1 bylo opět převzato z původní varianty elektroniky platformy.

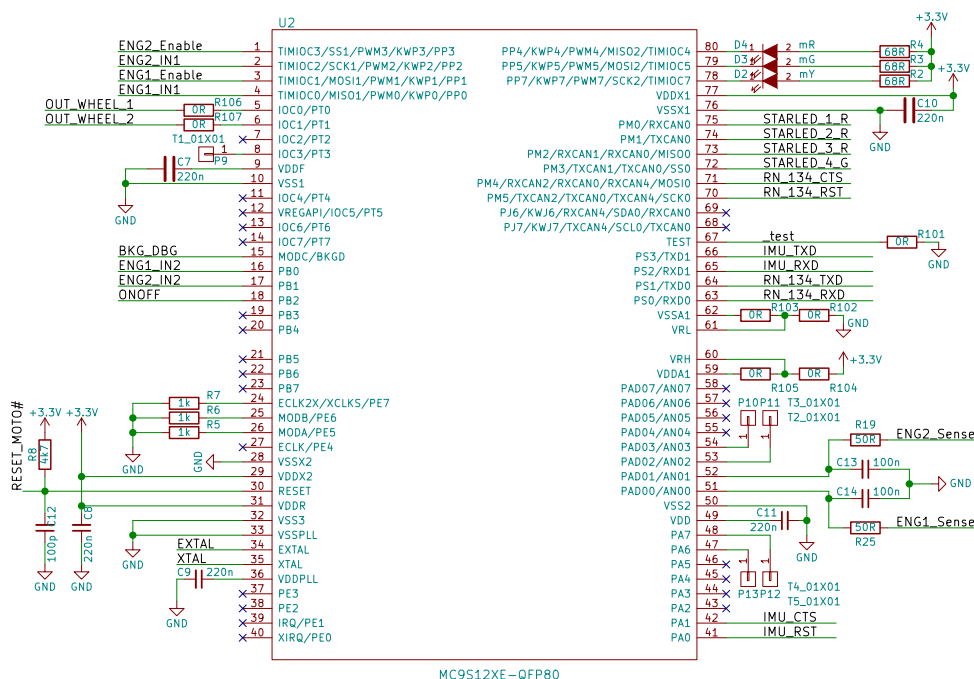
Při návrhu jsem se podobně jako dříve u spínaného zdroje na desce s budičem motorů snažil o optimální návrh rozmístění součástek na DPS. Zde byl návrh jednodušší, protože celá regulační smyčka je zde umístěna v pouzdru součástky a tak stačí jen zajistit, aby byly vstupní a výstupní kondenzátory co nejbližší daného pinu stabilizátoru. Všechny součástky jsem umístil na jednu stranu plošného spoje.



Obrázek 4.1: Schéma zdroje napájení procesoru.

Na vstupu obvodu je použita dioda, zabráňující prepólování vstupního napětí. Kondenzátory na vstupu a výstupu jsou použity k vyhlazení rychlých změn vstupního a výstupního napětí. Od zbytku plošného spoje je celý obvod možné oddělit propojkou 0R. Rezistor R999 se neosazuje, v návrhu je přítomen pouze pro vývojové účely.

4.2 Mikroprocesor



Obrázek 4.2: Schéma zapojení mikroprocesoru

K řízení SSP je použit mikroprocesor řady *MC9S12XE*. Z původní vývojové desky jsem převzal jeho zapojení, s tím že jsem vyvedení pinů procesoru na velké konektory (viz obrázek 2.5 nahradil jejich přímým připojením). Finální schéma zapojení procesoru je na obrázku 4.2. Protože je tato práce zaměřena zejména na návrh desky plošného spoje SSP, nebudu zde fungování procesoru a význam jednotlivých součástek podrobně popisovat, dále popíšu pouze součásti, které přímo souvisí s návrhem DPS - oscilátor, indikační diody a programovací konektor.

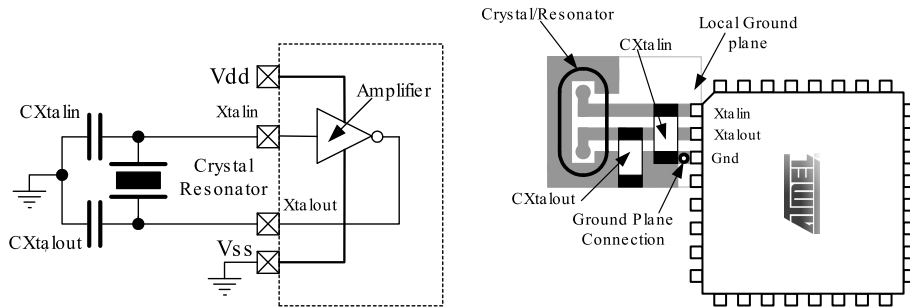
4.2.1 Oscilátor

Mikroprocesor využívá 16MHz oscilátor. Jedná se o velice kritickou součást a tak je nutné klást důraz na jeho korektní připojení k procesoru.

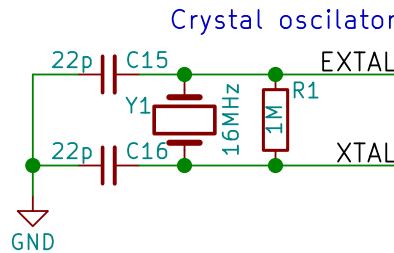
Díky tomu, že se dlouhé cesty na desce plošného spoje chovají jako antény může dojít k výskytu elektromagnetického šumu. Ačkoli samotný čip může být vůči tomu částečně imunní, ale pokud uděláme špatný návrh, tak se šum přesto projeví. Z toho důvodu nutné dát pozor na to, aby zapojení vodičů v okolí oscilátoru bylo optimální, v nejlepším případě by bylo dobré zredukovat jak parazitní indukčnost, tak parazitní kapacitu vodiče. To ale obecně není

možné, takže se většinou zaměřujeme zaměřit hlavně na indukčnost (viz obrázek 4.3). [10]

Konkrétní způsob připojení oscilátoru jsem nastudoval z manuálu k jinému procesoru [1], zapojení viz obrázek 4.3.



Obrázek 4.3: Připojení krystalu oscilátoru k procesoru použité v platformě. Převzato z [1].



Obrázek 4.4: Schéma připojení oscilátoru k procesoru

4.2.2 Signalizační diody

Pro signalizaci stavu procesoru se používají tři různé LED diody. Ze schématu 4.2 je patrné, že diody jsou rozsvěčovány tak, že procesor uvnitř připojí daný pin na zem. V rámci úprav schématu jsem se rozhodl použít místo dříve použitých tzv. *trough-hole* součástek diody v pouzdru SMD0805, a protože se jejich parametry od původních diod lišily, tak jsem musel zjistit novou hodnotu předřazených odporů.

Výpočet jsem prováděl s využitím následující teorie: K zajištění výrobcem udané svítivosti diody je nutné splnit určitého napětí na diodě při specifikovaném proudu, zde konkrétně $20mA$. K tomu se používá předřazený odpor, který zajistí, aby daný proud obvodem protékal. Vztah pro výpočet odporu je tedy následující:

$$R_p = \frac{U_{3V3} - U_F}{I_m} \quad (4.1)$$

kde U_{3V3} je napájecí napětí, U_F a I_m je napětí a proud při kterém má dioda specifikovanou svítivost.

V tabulce 4.1 jsou uvedeny vypočtené hodnoty použitých rezistorů.

	$U_F[V]$	$I_m[mA]$	$R[\Omega]$	$Re[\Omega]$
LED 0805 RED	2,1	20	60	68
LED 0805 GREEN	2,0	20	65	68
LED 0805 YELLOW	2,0	20	65	68

Tabulka 4.1: Vypočtené teoretické hodnoty rezistorů pro signalizační diody procesoru.

V posledním sloupci je uvedena hodnota použité reálné součástky.

4.3 Moduly IMU a Wi-Fi

Součástí elektroniky platformy jsou dále dvě externí zařízení připojená k desce s procesorem: inerciální měřicí jednotka (IMU) a modul pro komunikaci s řídicím programem v PC přes Wi-Fi.

V obou případech se jedná o elektronická zařízení třetích stran, používající k připojení 2 napájecí a 4 komunikační vodiče (RTS, CTS, TX, RX). Připojení bylo realizováno přes 6-pinové lišty.

V rámci návrhu zapojení jsem se zmínil o tom, že jednotku IMU umístím přímo na desku s procesorem. Tuto variantu jsem nakonec nerealizoval, aby bylo možné do budoucna jednoduše měřicí jednotku nahradit součástkou od jiného výrobce, tak jako tomu bylo dosud. Nicméně jsem na výslednou desku plošného spoje přidal několik montážních otvorů aby bylo možné daný modul IMU na desku s procesorem snadněji upevnit.

4.4 Modul pro měření rychlosti otáčení reakčních kol

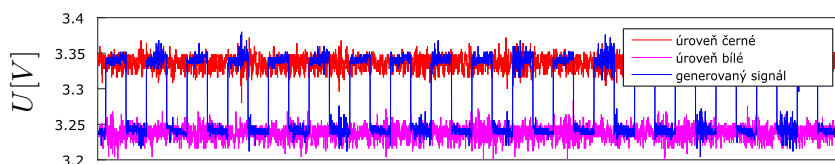
Pro účely zpětnovazebního řízení je měřena rychlost otáčení reakčního kola pomocí optického senzoru. Jeho výstup ale není závislý jen na barvě snímaného povrchu objektu, ale také na okolních světelných podmínkách, v závislosti na nichž se posouvá offset výstupního signálu. V nové verzi elektroniky jsem se rozhodl pro vylepšení funkcionality daný offset odstranit.

4.4.1 Testovací signál simulující snímání rychlosti otáčení

Pro účely návrhu obvodu pro odstranění stejnosměrné složky jsem s využitím naměřených parametrů výstupu senzoru CNY70 (tabulka 4.2) vygeneroval obdélník odpovídající snímanému signálu při otáčení reakčního kola, viz obrázek 4.5.

	úroveň černé	úroveň bílé	offset	rozkmit
U [V]	3,3399	3,2306	3,2852	0,1093

Tabulka 4.2: Výstup senzoru CNY70 Jedná se o obdélníkový signál o rozkmitu přibližně 100mV s offsetem $U_{off} = +3,2V$.



Obrázek 4.5: Porovnání generovaného signálu s naměřenými daty senzoru CNY70

Obrázek demonstruje pouze tvar signálu, proto graf neobsahuje časovou osu.

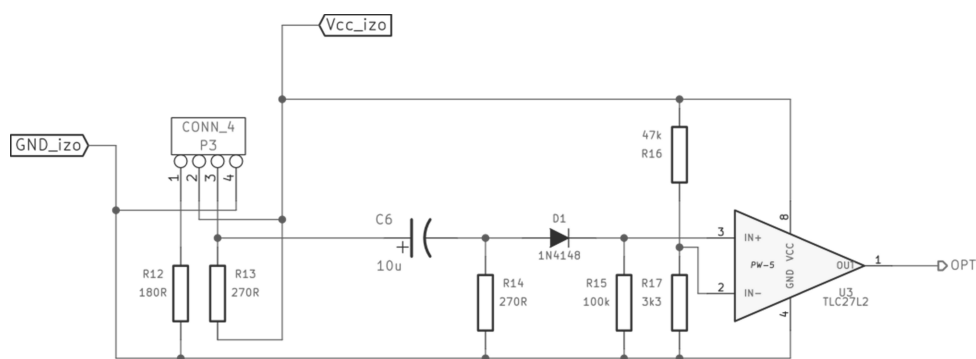
4.4.2 Obvod pro odstranění stejnosměrné složky

V rámci vývoje prototypu zařízení jsem nejprve převzal obvod z [8], který provádí odstranění stejnosměrné složky ze zdrojového signálu, a výsledek následně převádí na logickou hodnotu. Schéma obvodu je na obrázku 4.6.

Po vytvoření desky plošného spoje jsem ale dospěl ke zjištění, že převzatý obvod této aplikaci nefunguje, a to z toho důvodu, že na vstupu do operačního zesilovače je již signál zcela utlumen. Z toho důvodu jsem byl nucen převzatý obvod zásadně upravit.

4.4.3 Úpravy převzatého zapojení

Prvním krokem byl rozbor převzatého zapojení. Výstupní signál ze senzoru je přiveden na kondenzátor, zajišťující oddělení stejnosměrné složky a za ním zapojený pulldown rezistor, zajišťující vybíjení tohoto kondenzátoru. Tato část obvodu tvoří horní propust, jednoduchý derivační členek.

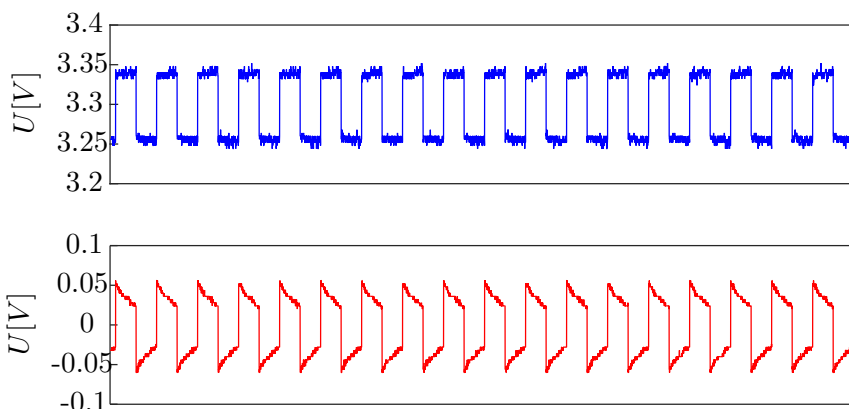


Obrázek 4.6: Schéma obvodu pro snímání rychlosti otáčení [8].

Na výstupních pinech senzoru je připojeno přes pull-up rezistoru napájení, druhý pin je připojen na zem.

Daný obvod má za úkol ze signálu odstranit stejnosměrnou složku a navázaný operační zesilovač hodnotu převede na buď logickou nulu - černá, nebo jedničku - bílá.

V důsledku toho je ale vyfiltrovaný signál zkreslený (viz obrázek 4.7), protože vybíjením kondenzátoru vznikají napěťové špičky. Pro odstranění těchto špiček se v převzatém zapojení používala polovodičová dioda. Nicméně právě z tohoto důvodu daný obvod při aplikaci v SSP nefungoval.



Obrázek 4.7: Demontrace zkreslení signálu po odstranění stejnosměrné složky

Signál na výstupu filtru měl totiž rozkmit přibližně pouze 110mV (viz tabulka 4.3). Úbytek napětí na polovodičové diodě je ale přibližně $0,7\text{V}$ a tak se jejím použitím signál zcela utlumil.

Jednou z možností, jak danou situaci vyřešit by bylo signál před vstupem do diody nejprve zesílit, to by ale vedlo k nutnosti použít ještě jednu součástku. Já jsem se rozhodl pro jinou možnost, pro převod logickou úroveň napětí přímo použít zkreslený signál.

tab	max	min
U[mV]	56	-60

Tabulka 4.3: Vyfiltrování stejnosměrné složky

Na rozdíl od původního schématu zapojení jsem místo jednoduchého komparátoru napěťové úrovně použil komparátor s hysterezí, a to z toho důvodu, že vyfiltrovaný signál obsahuje velké množství šumu.

4.4.4 Komparátor s hysterezí

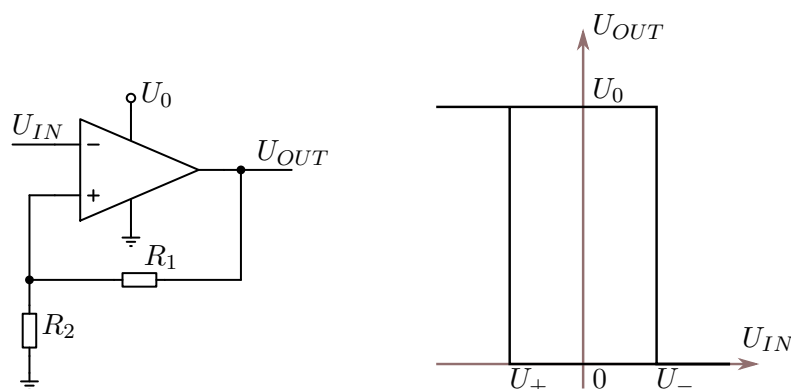
Při zjišťování rychlosti otáčení reakčního kola je dostačující pouze informace o frekvenci, je tedy jedno zda snímaná hodnota odpovídá logické nule, nebo logické jedničce a tak jsem k realizaci obvodu použil *invertující komparátor s hysterezí*.

Invertující komparátor s hysterezí má zavedenou kladnou sériovou napěťovou zpětnou vazbu z výstupního odporového děliče R_1, R_2 na neinvertující vstup [11], obr.4.8. Hodnotu překlápěcího napětí vypočteme následujícím způsobem:

$$U_+ = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_0 \quad (4.2)$$

$$U_- = - \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_0 \quad (4.3)$$

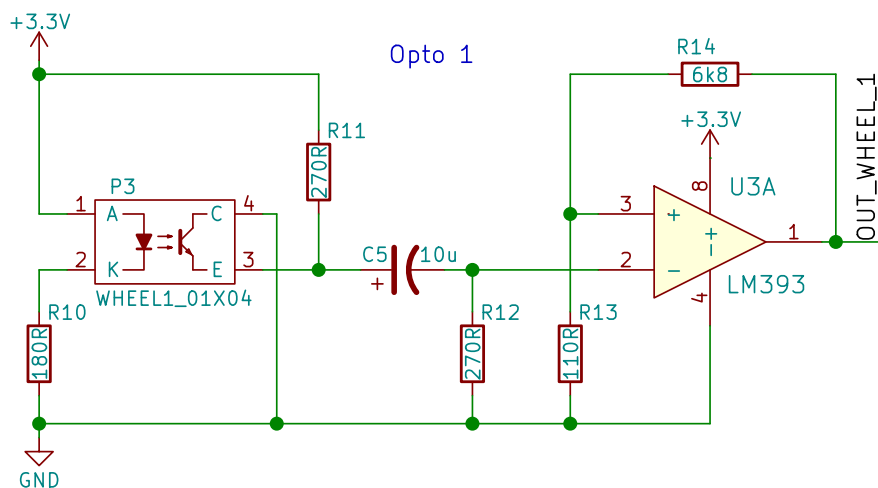
kde U_+ a U_- jsou překlápěcí úrovně napětí, U_0 je napájecí napětí komparátoru a R_1, R_2 jsou hodnoty zpětnovazebních rezistorů, viz obrázek 4.8.



Obrázek 4.8: Schéma a komparátoru s hysterezí a jeho hysterezní smyčka. Komparátor se mezi stavem s výstupem překlápí mezi stavem $U_{OUT} = 0V$ a stavem $U_{OUT} = U_0$ v okamžiku kdy vstupní signál U_{IN} přesáhne určitou hodnotu U_+ , příp. U_- nastavenou pomocí kladné zpětné vazby.

4.4.5 Finální realizace obvodu

Finální schéma detekčního obvodu frekvence otáčení reakčního kola je na obrázku 4.9.



Obrázek 4.9: Schéma upraveného detekčního obvodu frekvence otáčení reakčního kola

Výpočet parametrů zpětné vazby jsem provedl tak, že jsem si vyjádřil poměr napětí které mohu dosáhnout,

$$\beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2} = \frac{U_+}{U_0} \quad (4.4)$$

a našel hodnoty standardních rezistorů, které dávají co nejpodobnější hodnotu.

Dle naměřených dat (tabulka 4.3) jsem zvolil překlápěcí napětí $U_+ = 50mV$, pro který poměr odporů vychází následovně:

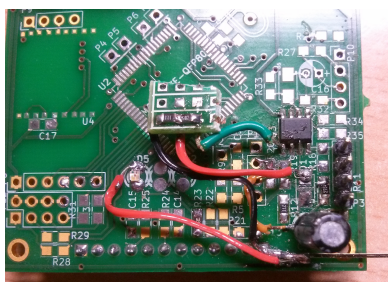
$$\beta = \frac{0,05}{3,3} = 0,01515$$

Tomuto poměru jsem se přiblížil použitím následujících hodnot rezistorů:

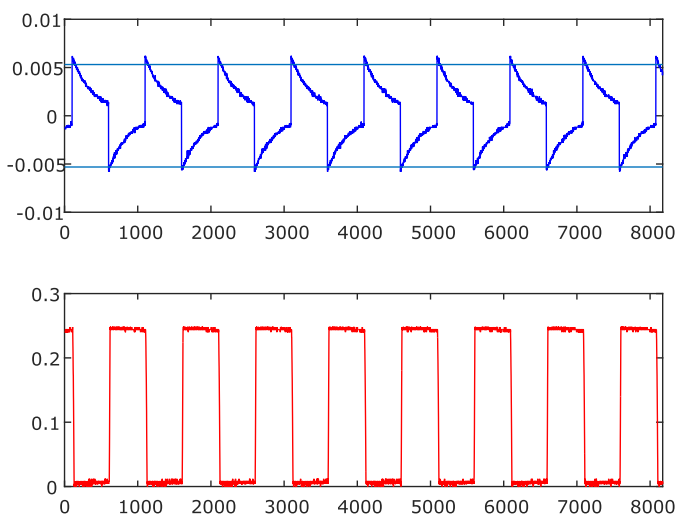
$$\begin{aligned} R_1 &= 110\Omega \\ R_2 &= 6800\Omega \end{aligned}$$

Pro ověření jsem dále vypočítal reálnou hodnotu překlápěcího napětí:

$$\begin{aligned} \beta(r) &= 0,01594 \\ U_+(r) &= 52,61mV \end{aligned}$$



Obrázek 4.10: Testovací obvod pro snímání stejnosměrné složky



Obrázek 4.11: Převod zkresleného signálu po odstranění stejnosměrné složky na logickou úroveň.

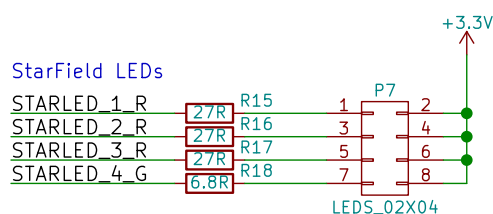
Zobrazena je situace pro signál s frekvencí 100Hz. Modrou čarou jsou naznačeny překlápěcí úrovně komparátoru.

K otestování funkčnosti detekčního obvodu jsem použil nefungující prototyp desky s procesorem, viz obrázek 4.10.

Pro konstrukci komparátoru s hystezí jsem v rámci vývoje prototypu použil operační zesilovač TLC27L2, který byl použit v převzatém schématu. Tento ale zesilovač nebyl typu *rail-to-rail*, který by na svém výstupu umožnil až hodnotu úrovně svého napájecího napětí. Z toho důvodu bylo na výstupu komparátoru v logické úrovni *HIGH* pouze 2,61V.

Ačkoli sice tato hodnota splňuje rozhodovací úroveň, tak by to způsobilo zcela zbytečný nesoulad mezi ostatními logickými signály na DPS. Proto jsem nakonec v rámci realizace finální desky plošného spoje místo součástky TLC27L2 použil komparátor LM393, který zajistí správnou hodnotu logické úrovně na výstupu.

4.5 Úpravy modulu pro StarTracker



Obrázek 4.12: Připojení diod vytvářejících obrazec pro modul StarTracker

LED diody obrazce pro modul StarTracker jsou připojeny přímo na piny mikroprocesoru a jsou rozsvíceny tak, že procesor vnitřně připojí daný pin na zem. V původní verzi elektroniky byla pro připojení diod použita samostatná deska plošného spoje s konektorem pro každou diodu a pull-up rezistorem. Tento modul byl v nové verzi elektroniky přesunut na desku s procesorem a z důvodu úspory místa jsou všechny diody zapojeny do jednoho konektoru (obr. 4.12).

Hodnot předřazených odporů jsou uvedeny v tabulce 4.4, vypočítány jsou s využitím vzorce 4.1

	$U_F[V]$	$I_m[mA]$	$R[\Omega]$	$Re[\Omega]$
LED 2,5mm RED	2,8	20	25	27
LED 2,5mm GREEN	3,2	20	6,5	6,8

Tabulka 4.4: Hodnoty rezistorů diod generujících obrazec pro modul StarTracker

Kapitola 5

Zhodnocení

V této kapitole zhodnotím realizaci celé bakalářské práce. Nejprve se budu věnovat splnění zadání, v druhé části zhodnotím návrh jak schématu, tak desky plošného spoje a nakonec se budu věnovat zhodnocení funkčnosti celého zařízení.

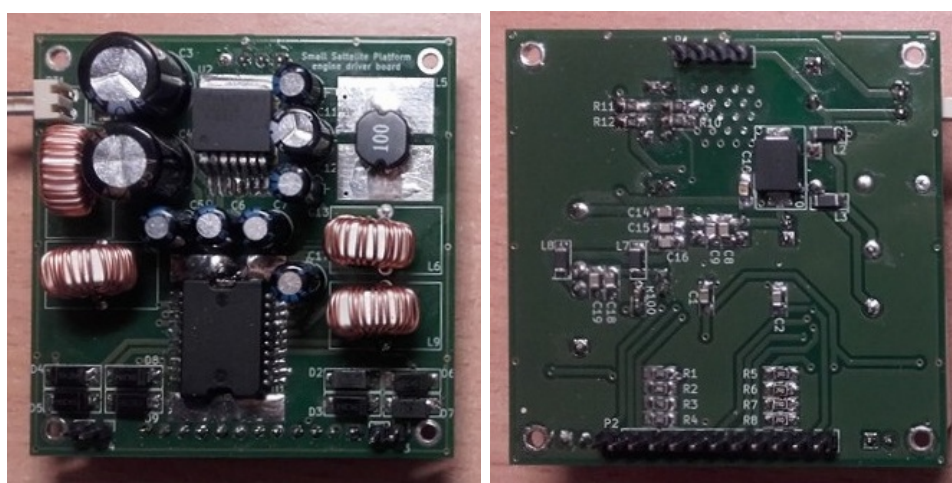


Obrázek 5.1: Sestavený výrobek

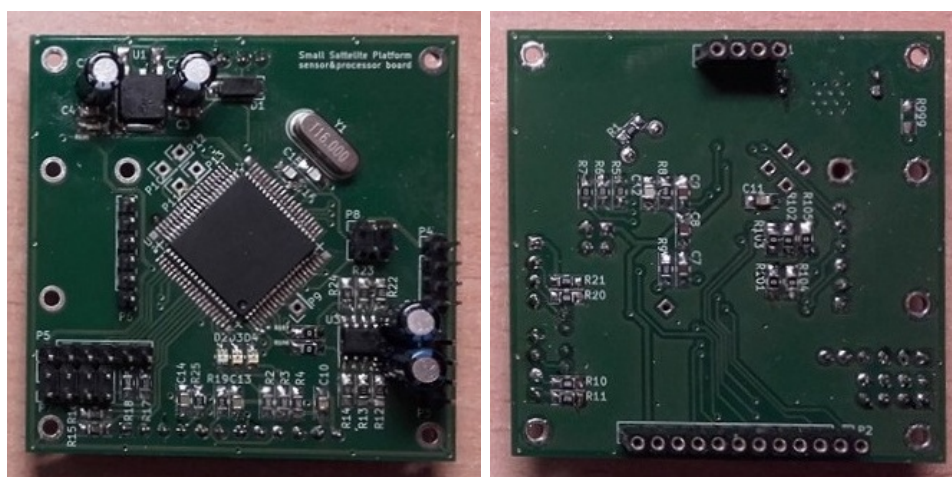
5.1 Splnění zadání bakalářské práce

V rámci zadání práce jsem měl upravit elektroniku používanou pro řízení Malé satelitní platformy. Navrhl jsem řešení, které využívá dvou vzájemně propojených desek.

Jak bylo již v textu zmíněno, tak měl proces vývoje elektroniky platformy dvě iterace. V rámci počátečního návrhu jsem nechal vyrobit prototyp a po jeho osazení, otestování a nalezení chyb jsem vytvořil finální návrh a jeho realizaci. Osazené DPS finálního výrobku jsou pak na obrázcích 5.2 a 5.3. Obě desky byly posléze otestovány, jejich funkcionalita je popsána v části 5.4.



Obrázek 5.2: Fotografie desky s budičem motorů



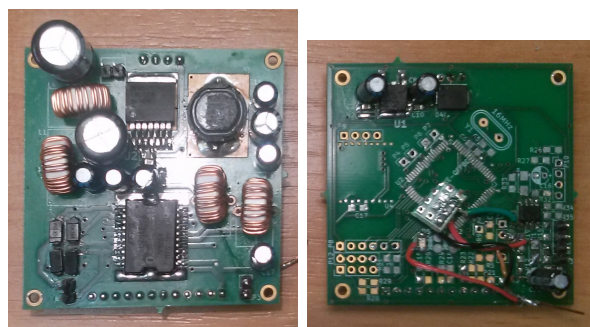
Obrázek 5.3: Fotografie desky s procesorem

Dále se mi podařila minimalizace počtu vnitřních vodičů. V původní verzi bylo pro propojení jednotlivých součástí s deskou s procesorem použito více

jak 100 vodičů. Tento počet byl zredukován pouze na 34 a jedná se pouze o vodiče použité k připojení externích zařízení, konkrétně

- 2 vodiče pro přivedení napájení
- 6 vodičů pro připojení Wi-Fi modulu
- 6 vodičů pro připojení jednotky IMU
- 2x2 vodiče pro připojení motorů reakčních kol
- 4x2 vodiče pro připojení led diod StarTrackeru
- 2x4 vodiče pro připojení optických senzorů

5.2 Zhodnocení prototypu zařízení



Obrázek 5.4: Fotografie prototypu zařízení

V průběhu návrhu plošného spoje mi bylo umožněno využít hromadnou objednávku v rámci kurzu návrhu plošných spojů. I když v dané době návrh nebyl ještě zcela připraven pro finální výrobu - nebyl jsem si jistý, zda všechny součásti budou fungovat, - tak jsem se přece jen rozhodl nechat desku vyrobiť.

Z dvou desek prototypu se mi nakonec podařilo zprovoznit pouze desku s budičem motorů. Ale ačkoli desku s procesorem nebylo možné celou ani osadit, tak jsem ji alespoň využil ke zprovoznění obvodu detekce rychlosti otáčení reakčních kol.

Osazené desky prototypu jsou na obrázku 5.4). V následujícím seznamu jsou shrnuty nejzásadnější odhalené návrhové chyby:

- Špatné označení vývodů polovodičové diody a přiřazení jejího pouzdra v rámci návrhu schématu, což mělo za následek poškození součástky budiče motorů.

- Nevhodné rozměry pájecích plošek u pouzder součástek, což mělo za následek ztížení, případně až znemožnění ručního osazování součástek, konkrétně procesoru.
- Nepropojení zemí 3V3 5V napájení. To mělo za následek to, že by procesor nemohl budič motorů ovládat.
- Nefunkčnost obvodu pro snímání rychlosti otáčení reakčních kol

Prototyp zařízení byl nakonec rozebrán a některé součástky použity při osazování finálního zařízení, protože v daném časovém intervalu nebylo možné sehnat nové součástky pro osazení finální verze DPS.

5.3 Zhodnocení finálního zařízení

Při návrhu finálního zařízení jsem se snažil dodržet určité parametry. Samotné desky plošného spoje jsou navrženy tak, že deska s procesorem splňuje Class4 a deska s budičem motorů dokonce Class3.

Schéma elektroniky je v příloze B. Dále na přiloženém CD je kromě vlastního textu bakalářské práce také kompletní návrh DPS v programu KiCAD a vygenerovaná Gerber data použitá při výrobě finální verze elektroniky platformy.

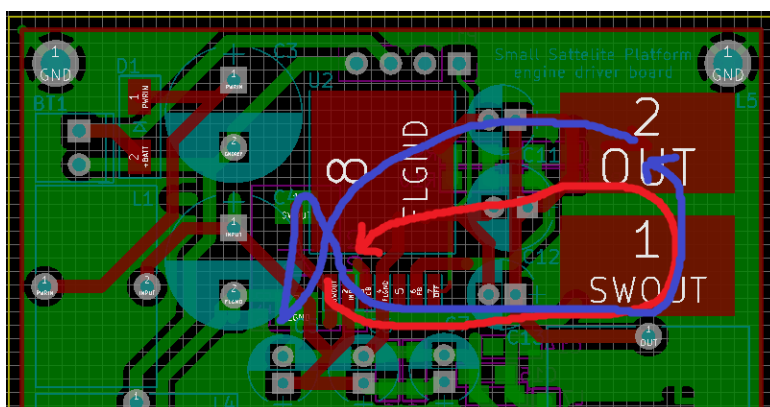
V následujících sekcích je zhodnocen návrh některých modulů finálního zařízení.

5.3.1 Návrh spínaného zdroje

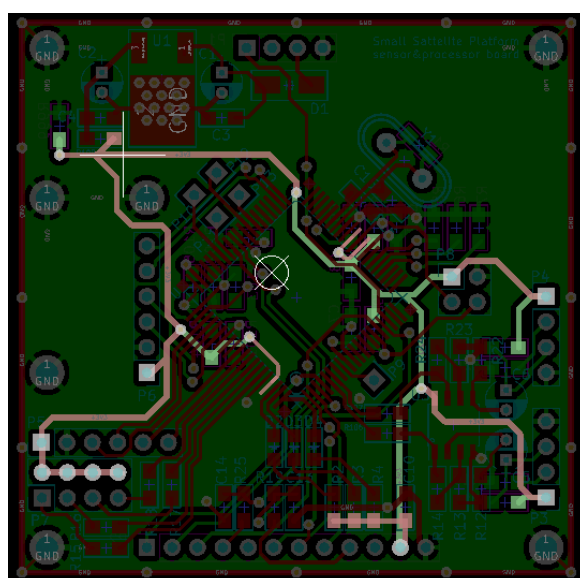
V průběhu návrhu finální desky plošného spoje jsem se zaměřil na správný návrh rozmístění součástek, abych splnil návrhová pravidla popisovaná v sekci 3.1.1. Přesto jsem v rámci návrhu udělal chybu, jednalo se o umístění diody. Ačkoli je z obvodového hlediska správně zapojena, tak je její polarita oproti optimálního zapojení obrácena, viz obrázek 5.5. I přesto ale bylo dosaženo podobné plochy smyčky v sepnutém a rozepnutém stavu regulátoru.

5.3.2 Rozvedení napájení

Na obrázku 5.6 je vyznačeno napájení jednotlivých součástek na desce s procesorem. Snahou bylo vytvořit cesty napájení na DPS co nejkratší.



Obrázek 5.5: Zhodnocení pravidel návrhu spínaného zdroje



Obrázek 5.6: Rozvedení napájení na DPS s procesorem.

■ 5.3.3 Mechanická odolnost

V rámci osazování prototypu jsem si ověřil, že pouze propojení desek pomocí konektorů není dostatečným prvkem pro zajištění mechanické odolnosti, hlavně z toho důvodu, že horní konektor je kratší menší než ten spodní. Nicméně to u finálního zařízení nevádí, protože mechanická odolnost může být vylepšena zpevněním rohů platformy upevněním distančních sloupeků připravenými montážními otvory v rozích plošného spoje.

5.4 Zhodnocení funkčnosti zařízení

Obě desky plošných spojů SSP byly úspěšně osazeny. Bylo provedeno otestování funkcionality jednotlivých modulů. Procesor zařízení je funkční, lze ho přes speciální redukci připojit k počítači a naprogramovat. Zprovoznění elektroniky jako celku je plánováno na nejbližší dobu, upevnění zařízení do mechanické konstrukce reálné platformy je tedy otázkou budoucího vývoje.

5.4.1 Zdroje napětí

Na DPS byly naměřeny následující reálné hodnoty úrovní výstupního napětí obou zdrojů napájení:

- 5,053V – zdroj na desce s budičem motorů
- 3,3461V – zdroj na desce s procesorem

5.4.2 Budič reakčních kol

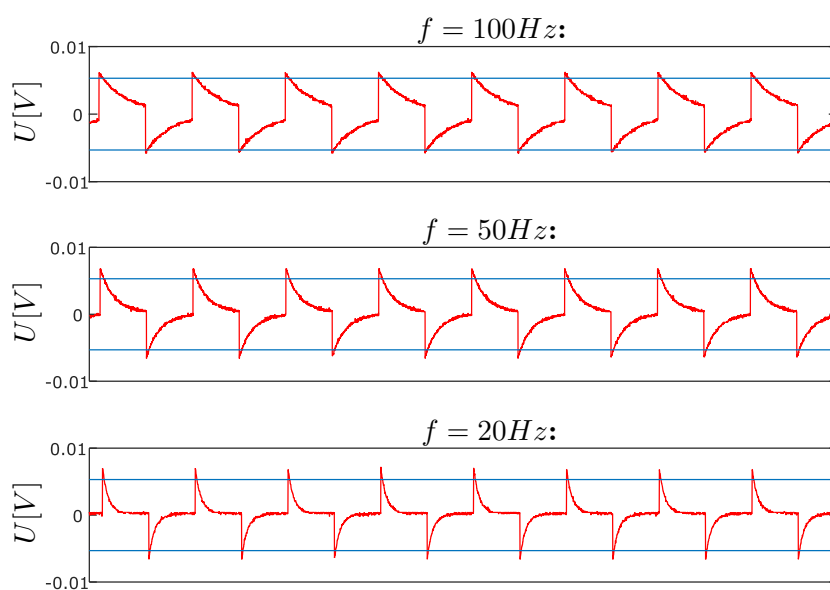
Budič reakčních kol byl otestován podobným způsobem, jako v případně prototypu, s využitím obvodu představeného v kapitole 3 na obrázku 3.8. Obvod se chová zcela korektně.

5.4.3 Obvod pro měření rychlosti reakčních kol

Na desce s procesorem byla testována finální realizace obvodu pro úpravu signálu ze senzoru detekujícího rychlost otáčení reakčních kol.

Volba využití komparátoru s hysterezí na rozdíl od obyčejného děliče napětí se ukázala jako velmi přínosná. Se snižující se frekvencí dochází k stále většímu zkreslení signálu po odstranění stejnosměrné složky, až jsou prakticky detekovány pouze napěťové špičky, viz obrázek 5.7. Protože byl ale použit komparátor s hysterezí, tak to při převodu nezpůsobuje problém. Na rozdíl od jednoduchého komparátoru s komparační úrovní nastavenou děličem napětí, který by začal kmitat, se použitý komparátor s hysterezí v okamžiku špičky napájení překloupí. Na výstupu dostáváme obdélníkový signál, který je možné použít přímo jako logický vstup do mikroprocesoru.

V případě velmi nízkých frekvencí pozice záporné špičky není správně detekována. To ale také nezpůsobuje problém, protože časová značka začátku



Obrázek 5.7: Tvar filtrovaného signálu z optického senzoru v závislosti na frekvenci.

Se snižující se frekvencí je výstupní signál stále více podobný sekvenci špiček napětí než obdélníkovému signálu. Přesto je možné tento signál zpracovat, právě díky použitému komparátoru s hysterezí, jehož překlápěcí úrovně jsou vyznačeny modrou linkou.

Obrázek demonstruje pouze tvar signálu, proto grafy neobsahují časovou osu.

periody je vždy detekována správně a pro určení frekvence není nutné znát střídu signálu.

Přesto má obvod pro detekci rychlostí otáčení reakčních kol určité meze, korektně funguje pouze v rozmezí následujících frekvencí:

$$f_{min} = 2Hz(110rpm) \quad (5.1)$$

$$f_{max} = 270Hz(16260rpm) \quad (5.2)$$

Tento interval je pro danou aplikaci v Malé satelitní platformě zcela dostatečný, protože použitá reakční kola mají maximální rychlost otáčení přibližně 10000rpm.

■ 5.5 Budoucí vývoj platformy

Na kompletní realizaci nové verze Malé satelitní platformy je nutné do budoucna dále pracovat. V první řadě je nutné navrhnout a na 3D tiskárně vytisknout nové díly mechanické konstrukce střední části, aby bylo možné řídicí elektroniku do mechanické konstrukce platformy upevnit. Dále půjde o úpravy řídicího programu v mikroprocesoru, zejména o vyladění regulační smyčky na nový hardware platformy a případně bude nutné provést úpravy programu v oblasti snímače rychlosti reakčních kol.

Do budoucna by se dalo uvažovat i o další miniaturizaci elektroniky, protože mnohé součástky by bylo možné nahradit alternativami s menšími rozměry.



Závěr

V této práci jsem se zabýval zjednodušením elektroniky malé satelitní platformy. Původní zapojení obsahovalo několik desek plošných spojů spojených množstvím propojovacích vodičů. Mým úkolem bylo jednotlivé části zařízení spojit na jednu desku.

Po rozboru stávajícího zapojení jsem se rozhodl navrhnout dvě samostatné desky propojené dvěma vertikálními konektory. První deska obsahuje silovou část platformy - zdroj napětí a obvody pro ovládání motorů reakčních kol - a ta druhá výpočetní jednotku - mikroprocesor spolu s dalšími obvody pro zpracování signálu.

Samotný návrh byl proveden ve dvou iteracích. První z nich byl prototyp, ve kterém jsem realizoval propojení původně oddělených částí a navrhl jiný obvod pro snímání rychlosti otáčení reakčních kol, odstraňující offset vzniklý v důsledku okolního osvětlení. V průběhu osazování desky jsem nicméně odhalil několik návrhových chyb, týkajících se zejména složitosti osazování desky, a také to, že obvod zmíněný výše nebyl v dané aplikaci použitelný. Při návrhu finálního zařízení jsem nalezené návrhové chyby opravil a navrhl jiný způsob odstranění stejnosměrné složky s využitím komparátoru s hysterezí. Dále jsem jednotlivé součástky na desce lépe logicky uspořádal.

Úspěšně jsem tedy upravil elektroniku malé satelitní platformy a minimalizoval počet vodičů nutných pro propojení jednotlivých součástí. Vyrobené desky plošných spojů byly osazeny a otestovány. Samotná elektronika je funkční, dalším krokem bude její upevnění do mechanické konstrukce platformy a následné zprovoznění zařízení v reálné aplikaci.



Přílohy

Příloha A

Literatura

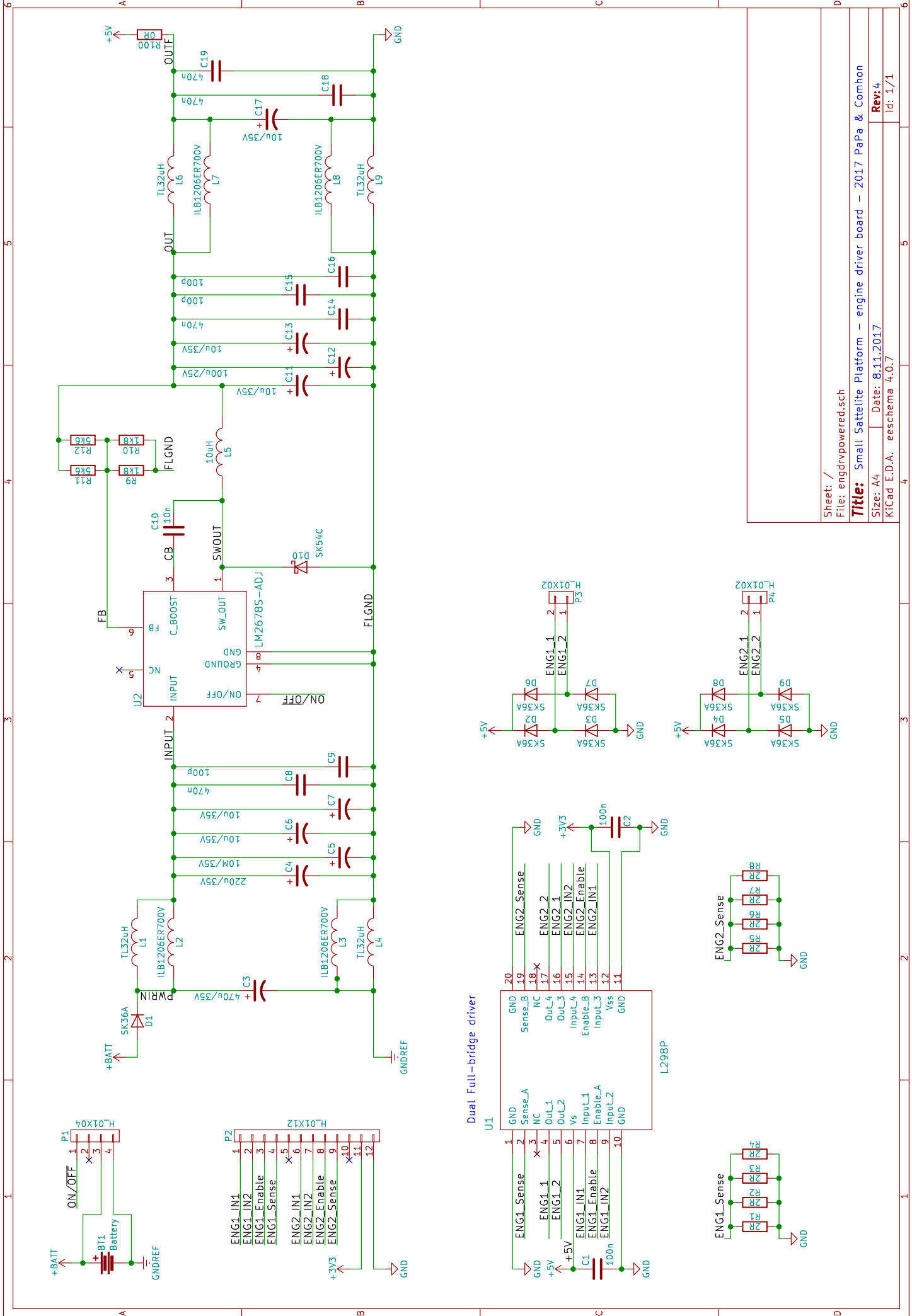
- [1] AtmelCorporation: *AVR186 Application Note. Best Practices for the PCB Layout of Oscillators*. Atmel Corporation Website [online], 2016, [cit. 27.12.2017].
URL http://www.atmel.com/Images/Atmel-8128-Best-Practices-for-the-PCB-Layout-of-Oscillators_ApplicationNote_AVR186.pdf
- [2] Cheon, D.-I.; Kim, J.; Choi, I.; aj.: An averaging algorithm for speed measurement of SCL/KAU reaction wheel. In *2011 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)*, Dec 2011, s. 880–883, doi:10.1109/SII.2011.6147565.
- [3] King, A.: Inertial navigation-forty years of evolution. *GEC review*, ročník 13, č. 3, 1998: s. 140–149.
- [4] Liebe, C. C.: Accuracy performance of star trackers - a tutorial. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, ročník 38, č. 2, Apr 2002: s. 587–599, ISSN 0018-9251, doi:10.1109/TAES.2002.1008988.
- [5] Marchitto, E.: *Small Satellite Platform For Illustrating Principles Of Spacecraft Stabilization*. Diplomová práce, Università degli Studi di Napoli 'Federico II'. Facoltà di Ingegneria, 2012.
- [6] Oland, E.; Schlanbusch, R.: Reaction wheel design for CubeSats. In *2009 4th International Conference on Recent Advances in Space Technologies*, June 2009, s. 778–783, doi:10.1109/RAST.2009.5158296.
- [7] Oluwatosin, A. M.; Hamam, Y.; Djouani, K.: Attitude control of a CubeSat in a Circular Orbit using Reaction Wheels. In *2013 Africon*, Sept 2013, ISSN 2153-0025, s. 1–8, doi:10.1109/AFRCO.2013.6757617.
- [8] Schinkmann, B.: *Elektronika navigační kalibrační vlečné sondy*. Diplomová práce, České vysoké učení technické v Praze. Fakulta elektrotechnická, 2015, s. 67.

- [9] Semiconductor, N.: *LM2678 SIMPLE SWITCHER High Efficiency 5A Step-Down Voltage Regulator*. Octopart Search Engine [online], 2003, [cit. 27.12.2017].
URL <<http://datasheet.octopart.com/LM2678S-ADJ/NOPB-National-Semiconductor-datasheet-9611573.pdf>>
- [10] Troise, C.: *AN1709 Application Note. EMC design guide for ST micro-controllers*. STMicroelectronics Website [online], 2003, [cit. 27.12.2017].
URL <<http://www.st.com/stonline/books/pdf/docs/9914.pdf>>
- [11] Vedral, J.; Fisher, J.: *Elektronické obvody pro měřicí techniku*. České vysoké učení technické, druhé vydání, 2004, ISBN 80-01-02966-2, s. 116-117.
- [12] Záhlava, V.: *Návrh DPS a EMC - spínané stabilizátory*. České vysoké učení technické, kurz Principy a pravidla elektronického návrhu, [online], 2016, [cit. 27.12.2017].
URL <https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/68983/mod_resource/content/1/08_EMN_ napajeci_zdroje.pdf>



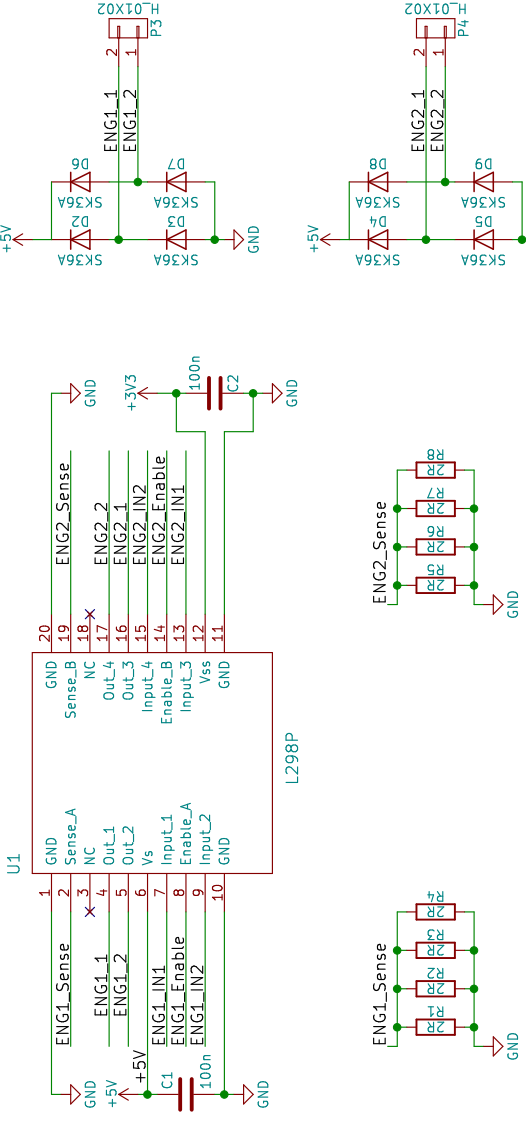
Příloha B

Schémata zapojení



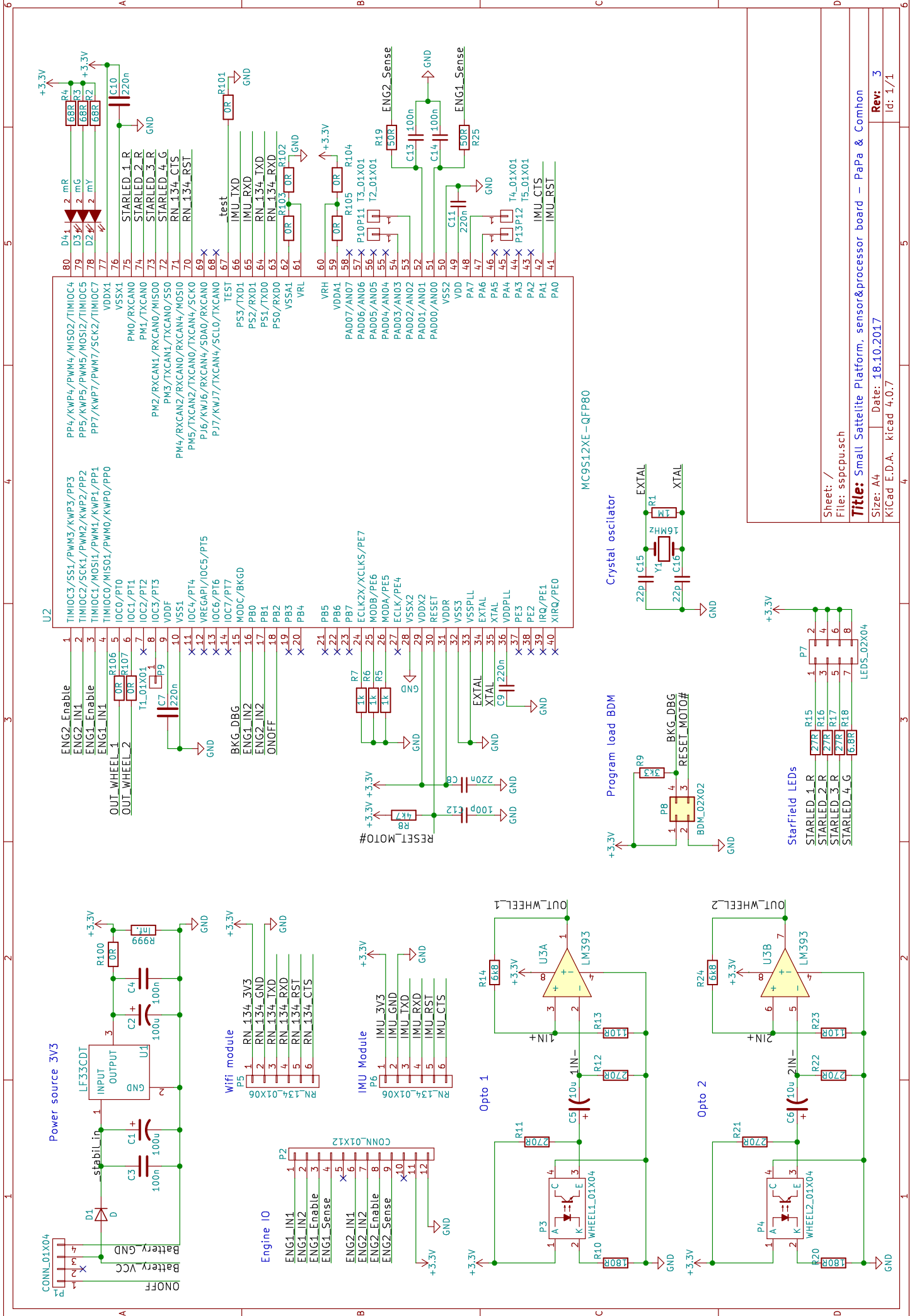
Sheet: /
 File: engdrvpowered.sch
Title: Small Satellite Platform – engine driver board – 2017 PaPa & Comhon
 Size: A4 Date: 8.11.2017 Rev: 4
 KiCad E.D.A. eeschema 4.0.7 Id: 1/1

Dual Full-bridge driver



1 2 3 4 5

6



Sheet: /
 File: sspcpu.sch
Title: Small Satellite Platform, sensor&processor board – PaPa & Comhon
 Size: A4 Date: 18.10.2017
 KiCad E.D.A. kicad 4.0.7

Rev: 3
 Id: 1/1