

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2013

Bc. Michal Runták

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra informatiky

System automatického udržování rovnováhy
Automatic system for Balancing

2013

Bc. Michal Runták

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra informatiky

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Michal Runták**

Studijní program: N2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor: 2612T025 Informatika a výpočetní technika

Téma: **System automatického udržování rovnováhy**
Automatic System for Balancing

Zásady pro vypracování:

Navrhňte dvoukolový podvozek pro pohyb osoby ovládaný náklonem obsluhy. Navrhňte potřebnou mechanickou část, včetně motorů. Následně navrhňte řídicí obvody, vyberte vhodná čidla - gyroskop, akcelerometr, inklinometr, řídicí počítač a napište potřebné programové řízení.

1. Seznamte se s problematikou dvoukolových robotických podvozků.
2. Navrhňte vlastní mechanické řešení dvoukolového podvozku.
3. Navrhňte řídicí obvody.
4. Vyberte vhodný řídicí počítač nebo počítače. Vyberte vhodná čidla.
5. Navrhňte programové řízení.
6. Vyzkoušejte navržené zařízení a otestujte jeho možnosti.

Seznam doporučené odborné literatury:

<http://www.robotika.cz>


Další literatura a datové listy dle zvolených a dostupných komponent.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

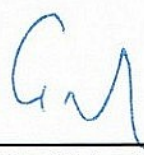
Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Olivka**

Datum zadání: 16.11.2012

Datum odevzdání: 07.05.2013


doc. Dr. Ing. Eduard Sojka
vedoucí katedry




prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Poděkování

Chtěl bych poděkovat Ing. Petru Olívkovi za odbornou pomoc, věcné připomínky, rady a vedení při tvorbě této diplomové práce.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne 6.5.2013



Bc. Michal Runták

Abstrakt

Ve dnešní uspěchané době je základní myšlenkou pohyb, resp. přeprava osob a materiálů na cílová stanoviště. Mimo konvenční způsoby se rozvíjí i vylepšená osobní přeprava, která využívá technologické vymoženosti poslední doby. Řada projektů využívá dotační programy a často končí v prototypových fázích, takže se do komerčního sektoru nedostanou. Do prodeje se dostávají zejména ta přepravení zařízení, která nabízejí inovace skloubené s technologickým vývojem a marketingovou podporou. Nejznámějším zařízením v této oblasti je dvoukolový elektrický dopravní prostředek Seegway, k jehož masovému rozšíření brání velmi vysoko nastavená cenová politika, která stojí za snahami popsání funkčnosti a vytvoření alternativní verze tohoto dopravního prostředku.

Klíčová slova

náklon, inklinometr, gyroskop, akcelerometr, řízení otáček PWM, optická závora, motory, převody, samo-vyvažovací

Abstract

In this rush time, basic idea is a movement, respectively transportation of people and materials to their target destinations. Outside the conventional methods, improved passenger transportation is developed. It uses technological advances of recent years. Many projects uses grant programs and often end up in the prototype stages, so they do not get into the commercial sector. To the sale, only those devices get, which offers innovation reconciled with technological development and marketing support. The most known device in this area is a two-wheel electric vehicle called Segway, only high price obstructs its mass expansion. Price also stands behind the efforts for describing its functionality and creating an alternative version of this vehicle.

Keywords

inclination, inclinometer, gyroscope, accelerometer, speed control PWM, optical gate, motors, gearboxes, self-balancing

Seznam použitých symbolů a zkratek

AC	- střídavý proud
ASSEMBLER	- jazyk symbolických adres
CLR	- Clear
DC	- stejnosměrný proud
DPS	- Deska Plošných Spojů
PPS	- Peripheral Pin Select
IR	- Infra Red
ICSP	- In Circuit Serial Programming
IDE	- Integrated Development Enviroment
IGBT	- Insulated Gate Bipolar Transistor
LASER	- Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LED	- Light Emmiting Diode
TTL	- Transistor – Transistor Logic

Obsah

1 Úvod	1
1.1 Popis jednotlivých kapitol	1
2 Dvoukolové robotické podvozky.....	3
2.1 Výhody a nevýhody dvoukolových samo-vyvažovacích podvozků.....	3
2.2 Příklady zařízení využívajících samo-vyvažování a popis jejich fungování.....	5
2.3 Výběr základní koncepce mého zařízení.....	8
2.4 Výběr motorů a akumulátorů.....	8
3 Mechanické řešení.....	10
3.1 Volba materiálu.....	10
3.2 Základní deska.....	11
3.3 Uchycení kol.....	12
3.4 Uchycení řídítek.....	13
3.5 Motory a převody.....	14
3.6 Úchyt akumulátoru.....	15
3.7 Vyvážení podvozku.....	15
4 Návrh DPS a elektronického zapojení	18
4.1 Blokové schema.....	18
4.2 Jistící obvody	19
4.3 Výběr snímačů náklonu plošiny a řídicí tyče.....	19
4.4 IvenSense MPU 6050 – deska gyroskopu a akcelerometru.....	22
4.5 Napájecí DC/DC měnič pro obvody logiky.....	25
4.6 Měření rychlost otáček kol.....	26
4.7 Deska řídicí logiky.....	27
4.8 IGBT silový obvod – dvojitý H most.....	33
4.9 Budiče IGBT.....	34
5 Návrh programového řešení	38
5.1 Popis hlavní části programu.....	38
5.2 Inicializace vstupních a výstupních portů.....	39
5.3 Nastavení modulu pulzně šířkové modulace (PWM).....	40
5.4 I2C komunikace s modulem MPU 6050.....	41
5.5 Návrhy možných korekčních algoritmů.....	43
6 Závěr	44
7 Seznam použité literatury	45
8 Přílohy	47

1 Úvod

Tato diplomová práce se věnuje problematice dvoukolových podvozků, které jsou schopny samo-vyvažování, zejména pak jednomístných dvoukolových plošin vhodných k přepravě osob, či nákladu. V práci jsou popsány různé metody řešení stabilizace dvoukolových podvozků, dále jsou rozebrány pohony a je mezi nimi vybrán nejvhodnější s důrazem na cenu a co nejvyšší jednoduchost konstrukce při zachování co nejvyšší kvality.

Co jsou to jednomístné dvoukolové podvozky vhodné k přepravě osob či materiálu a k čemu jsou vhodné? Jednomístný dvoukolový podvozek si lze představit jako plošinu se dvěma koly po stranách, která jsou hnána motorem, či motory a směr a rychlost jejich otáček je řízen tak, aby nedošlo k nežádoucímu náklonu plošiny. Jako nežádoucí jev tohoto balancování je pohyb plošiny vpřed, či vzad, čehož lze využít k efektivnímu řízení rychlosti pohybu plošiny pouhou změnou těžiště osoby plošinou převážené.

Zařízení vzniklé na základě návrhů z této diplomové práce bude schopno automatického vyvažování, změny směru pomocí řídicí tyče vybavené madly, změny rychlosti na základě úhlu náklonu, reverzace kol a také otáčení na místě (každé kolo se točí opačným směrem). Součástí práce je také prototyp zařízení.

1.1 Popis jednotlivých kapitol

Celá práce je rozdělena do několika kapitol, které reflektují postup úprav a zdokonalení prototypu plošiny.

V první kapitole se zabývám problematikou dvoukolových robotických podvozků. Rozebírám možnosti pohonných systémů, klady a zápory stejnosměrných a střídavých motorů, systémy pro jejich řízení. Analyzuji různé možnosti napájení zařízení a vybírám vhodný akumulátor. V první kapitole je také popsáno několik již funkčních zařízení, která využívají samo-vyvažování.

Druhá kapitola se věnuje návrhu mechanického řešení vlastní konstrukce dvoukolového podvozku. Vybírám zde materiály vhodné ke konstrukci jednotlivých dílů a vymyslím jakým způsobem uchytit jednotlivé komponenty k základní desce tak aby bylo zařízení vyvážené i ve vypnutém stavu. Vybrány jsou také kola a je řešen jejich pohon a uchycení k základní desce. Základní konstrukce je vyrobena z hliníku, o pohon se starají dva stejnosměrné 250 W motory a na jedno nabití akumulátoru se předpokládá dojezd cca. 15 km. Baterie je v průběhu jízdy z kopce, nebo při zpomalování rekuperačně dobíjena.

Ve třetí kapitole se navrhuje plošné spoje a elektronické zapojení řídicích obvodů logické části a silových obvodů pro řízení otáček motorů včetně výběru vhodných IGBT tranzistorů a jejich budících obvodů. Také se zaměřuji na problematiku H mostů a jejich buzení napětím vyšším než je napětí zdroje. Je vybrán dostatečně výkonný akumulátor za rozumnou cenu a zvažena možnost jeho

rekuperačního dobíjení brzděním. Déle se v kapitole věnuji umístění desek plošných spojů na základní desku podvozku. Nedílnou součástí kapitoly je výběr vhodných motorů a rozbor jejich řízení. V kapitole není opomenuto ani chlazení součástek, které se zahřívají.

Čtvrtá kapitola se zabývá výběrem vhodného mikropočítače a čidel, řeší se kolik mikropočítačů bude použito. Jsou rozebrány různé metody měření náklonu plošiny. Popsány jsou gyroskopy, akcelerometry, elektronické kompas, rtuťové náklonoměry, náklonoměry na magnetické bázi, optické, infračervené a ultrazvukové dálkoměry. Probrány jsou jejich výhody, nevýhody a vhodnost jejich použití pro dané zařízení. Je vybráno několik čidel od různých výrobců a je zvoleno nejvhodnější.

V páté kapitole navrhuji programové řešení. Je vybrán programovací jazyk vhodný pro vybraný mikropočítač. Jsou popsány knihovny, které lze využít pro jednodušší ovládání mikropočítače. Je popsáno jakým způsobem komunikovat po I2C sběrnici s čidlem náklonu. Dále je rozebráno jak lze efektivně řídit otáčky stejnosměrných motorů pomocí pulzně šířkové modulace (PWM).

V poslední - šesté kapitole hodnotím hotové zařízení a výsledky práce. Dále se zabývám možnostmi komerčního nasazení výrobku jakožto levného ekologického elektrického motorového prostředku pro přesun osob.

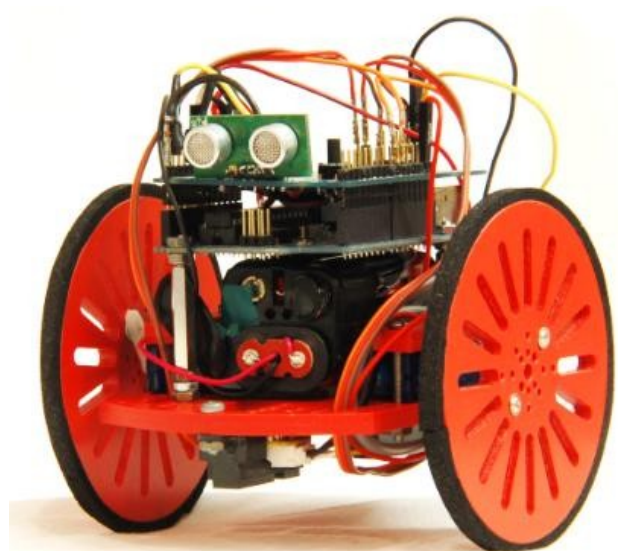
2 Dvoukolové robotické podvozky

Před zahájením činnosti na diplomové práci mne zaujaly dvoukolové samo-vyvažovací podvozky. Jako příklad lze uvést například výrobek americké firmy Segway® pro přesun osob ve městě i v terénu. Dalším příkladem jsou malí roboti, kteří jsou schopni balancovat na dvou kolech a neztratí rovnováhu.[2][13]

Myšlenka automatické stabilizace podvozku se mi zalíbila a rozhodl jsem se jí hlouběji zabývat a proto jsem si ji vybral jako téma diplomové práce s cílem vyrobit dvoukolovou plošinu vhodnou k přepravě osob.



Obr.1 Výrobek firmy Segway® [2]



Obr.2 Samo-vyvažovací robot [13]

2.1 Výhody a nevýhody dvoukolových samo-vyvažovacích podvozků

Samo-vyvažovací dvoukolový robotický podvozek už z názvu neoplývá stabilitou. Je to dáno tím, že stojí na zemi pouze na dvou bodech (spodní části pneumatik) a při každém pohybu těžiště se pohybuje buď vpřed, nebo vzad aby tento pohyb kompenzoval. Tuto kompenzaci musí na základě údajů z čidel (měří se náklon plošiny) vypočítat řídicí jednotka a poté rozpohybovat kola aby byl vyvolán patřičný protipohyb. Zatačení je už poměrně jednoduché, lze řešit pouhou změnou otáček kol vůči sobě.

Další nevýhodou těchto podvozků je fakt, že vyvažování spotřebuje poměrně velké množství energie, které by u podvozku se třemi a více koly nebylo prakticky vůbec nutné. Taktéž při rekuperačním dobíjení akumulátoru brzděním nelze dosáhnout takové účinnosti jako u podvozku,

kteří stabilizaci nepotřebují právě proto, že se energie ztrácí na stabilizaci. Taktéž stabilita je omezená – pokud se těžiště posune příliš a motory nebudou umět toto posunutí těžiště kompenzovat (bude třeba vyšší výkon než jaký motory dokáží vyvinout), dojde nevyhnutelně k havárii podvozku. Totéž může nastat při vybití akumulátoru, nebo poruše snímače náklonu.

Lze tedy říci, že robotické samo-vyvažovací podvozky nejsou z hlediska úspory energie a bezpečnosti vhodné pro přepravu osob. Opomíjíme ovšem dvě jejich obrovské výhody.

První výhodou je, že dvukolový podvozek má při pohledu shora velmi malý půdorys, což jej činí velmi vhodným do hustého provozu, ke kličkování mezi množstvím chodců na chodníku, či cestě na ulicích přelidněných měst. Taktéž je poměrně dobrá manévrovatelnost v terénu (za předpokladu použití dostatečně výkonných motorů a terénních kol).

Lidé jedoucí na takovýchto dopravních prostředcích jsou také vyvýšení vůči davu, čehož s oblibou využívají policisté, či armáda, kteří v mnoha zemích vybavují své zaměstnance výrobky firmy Segway®. Výše stojící orgán veřejné moci tak působí futuristicky a poměrně autoritativně. Nevýhodou je ovšem větší šance na sestřelení oproti chodcům výše stojícího cíle – tato nevýhoda je mírně kompenzována vyšší rychlostí, kterou se osoba na podvozku oproti chodci pohybuje.



Obr.3 Čínská elitní policejní jednotka vybavena přepravními prostředky firmy Segway® [15]

2.2 Příklady zařízení využívajících samo-vyvažování a popis jejich fungování

V této podkapitole uvedu dvě zařízení využívající samo-vyvažování, nejprve popíšu běžný typ modelářského robota na stůl a poté hi-tech zařízení firmy *Segway*®.

Samo-vyvažovací roboti:

Většina samo-vyvažovacích robotů jsou v podstatě hračky a nemají praktické využití. Jsou však velmi vhodné k pochopení jak samo-vyvažování funguje. Tito roboti mají kola poháněna převážně stejnosměrnými motorky, někteří mají dokonce kola spojená tyčí a poté jsou poháněna jen jedním motorem – tito roboti nejsou schopni zatačet.

Ovládání směru stejnosměrných motorů se řeší H mosty. Každý H most je tvořen čtyřmi tranzistory a jejich otevřením do kříže lze měnit směr proudu jež protéká zátěží – motorem. Detailnější popis H mostů je ve třetí kapitole této práce.

Někdy jsou namísto obyčejných motorů použity motory krokové, kterými lze s jistými obtížemi simulovat plynulé otáčení rotoru. Výhodou krokových motorů je to, že přesně víme o kolik se motor otočil v danou chvíli, není tedy nutno měřit jeho otáčky. Na rozdíl od stejnosměrných motorů, které i když jsou stejné, tak se díky konstrukční odchylce mohou při stejném napájecím napětí točit lišícími se otáčkami. Pro demonstrativní účely na malých robotech ovšem ve většině případů není nutno měřit otáčky ani u obyčejných stejnosměrných motorů. U drtivé většiny postačí softwarová korekce, která rozdíl otáček motorů eliminuje.

Protože se nepředpokládá jízda ve členitém terénu, ale pouze na rovné podlaze bez děr a překážek postačí těmto robotům ke stabilizaci znát výšku přední části základny od rovné plochy po které robot jede. Když je tato vzdálenost stejná jako je vzdálenost podstavy pod osami kol je robot vyvážen. Pokud klesne a robot se nakloní dopředu, je nutné začít přidávat otáčky motorům aby rozpochovaly robota směrem vpřed. Zrychlování trvá do doby než se základna začne naklánět na opačnou stranu. Poté se otáčky motorům začnou snižovat, popřípadě se změni směr otáčení motorů (reverzace). Pokud by bylo těžiště posunuto do předu na tolik, že ani nejvyšší otáčky motorů by nebyly schopny začít základnu vyrovnávat dojde nevyhnutelně k havárii robota.

Tito základní roboti měří výšku od podlahy převážně infračervenými dálkoměry, výjimkou ovšem nejsou ani ultrazvuková, či velmi ojediněle laserová měřidla vzdálenosti. Podmínkami pro použití těchto čidel jsou dostatečná rychlost měření (aby počítač stíhal počítat korekce otáček rychleji než se plošina převrátí) a odolnost vůči rušení okolními vlivy (světlo z jiných zdrojů, přístroje generující rušivé ultrazvukové, či elektromagnetické vlnění).

Energii získávají roboti především z litium-polymerových, či jiných akumulátorů. Protože jsou to většinou vědecké, či studijní projekty můžeme se setkat s pohonem na alternativní paliva jako je vodíkový palivový článek, či solární panely.

O řízení se starají mikropočítače u kterých není třeba vysokého výpočetního výkonu. Jejich jedinou prací je načíst data z dálkoměru, vyhodnotit zda je tento údaj vyšší, nebo nižší než pevně zadaná hodnota odpovídající vzdálenosti plošiny od země pod osami kol a poté spustit buď rutinu pro přidávání, nebo pro snižování otáček kol. Reverzace většinou bývá součástí těchto rutin. Při použití stejnosměrných motorů je vhodné když jsou mikropočítače vybaveny moduly pro pulzně šířkovou modulaci (PWM detailně popsána ve třetí kapitole).

Osobní transportér firmy Segway:

Osobní transportér Americké firmy Segway je první masivně rozšířený samo-vyvažovací osobní transportér. Firma ho vyrábí v mnoha verzích do města i do terénu. Taktéž jsou vyráběny modely určené pro policii, či armádu. Nabízeno je také mnoho příslušenství jako jsou boxy, majáky a jiné. Popíšu zde základní verzi Segway i2 osobního transportéru, ostatní verze jsou ovšem na úplně stejném principu a liší se podle toho, k čemu jsou určeny.

Směr vpřed a vzad se ovládá pouze změnou těžiště, tedy náklonem osoby řídící zařízení. Když se člověk nakloní zařízení se rozjede kupředu. Zatačení je řešeno pomocí tyče s říditky podobnými koloběžce, jejichž náklonem se změní poměr mezi otáčkami kol a zařízení začne zatáčet. Brzdění se provádí jednoduše tak, že na říditka přestaneme tlačit, popřípadě je chytíme a zakloníme se dozadu. [4]

První verze transportéru série i používaly dva NiMH (nikl metal-hydrid) akumulátorové sady. Každá z nich se skládala ze šedesáti článků. Později byly NiMH články nahrazeny sice dražšími, ovšem co se kapacity a počtu nabíjecích cyklů týče, lepšími akumulátory Lithium iontovými. Dle specifikací výrobce má každá bateriová sada kapacitu 5,2Ah a napětí 73,6V (cca 1.2V na článek). Z vybitého stavu se dle specifikace nabije do maxima své kapacity za necelých 8 hodin. Obě sady váží dohromady 10,3 kg, což není na 73,6V baterii o kapacitě 10,4Ah mnoho. Rozměr každé baterie je 35,7 x 19 x 8.2 cm.

Baterie jsou instalovány zespodu zařízení, aby svou vahou posunuly těžiště co nejnižší. Baterie jsou uloženy v masivních plastových schránkách, které po montáži tvoří spodní stranu základní desky. Dobíjení je řešeno pomocí elektroniky, která vyhodnocuje aktuální napětí baterie a teplotu baterie a volí vhodný nabíjecí proud a dobu nabíjení. Akumulátory jsou dva proto, aby když jeden selže, mohl transportér dojet na akumulátor druhý a nedošlo ke zranění cestujícího. V běžném provozu ovšem akumulátory pracují společně.

Pneumatiky jsou bezdušové, vyrobené firmou Michelin a mají namísto uhlíku obsahovat křemík, což dle výrobce omezuje vnik černých čar při brzdění a zatačení a také zvyšuje přilnavost. Osy devatenácti palcových kol transportéru jsou záměrně umístěny nad plochou která slouží ke stání řidiče, tímto je těžiště posunuto pod osu kol a když se transportér rovnoměrně zatíží, tak by měl zůstat pořád vyvážený i bez elektronické stabilizace. Zařízení je rovněž konstruováno tak, aby při vypnutém napájení bylo vyváženo v rovnovážném stavu mechanicky – pomocí vhodně rozložených hmotností součástí ze kterého je zařízení poskládáno (mnou zloužený Segway toto bohužel neuměl a po vypnutí padal dopředu).

O pohon se starají dva elektromotory firmy Pacific Scientific a v poměru k jejich velikosti a hmotnosti jde o nejsilnější sériové vyráběné motory (tvrzení výrobce). Každý motor dovede vyvinout výkon až 1,5 kW. Motory jsou trojfázové bezkartáčové, což eliminuje opotřebení a zvyšuje životnost motorů. Magnety v motorech jsou neodymové. Zvláštním bezpečnostním prvkem jsou dvě vinutí, každé připojeno k vlastní řídicí desce. Za běžných podmínek fungují obě vinutí společně a dělí se o přenášený výkon. Pokud ovšem dojde k poruše jednoho z vinutí, tak se jeho řídicí deska odpojí a zařízení bezpečně zastaví, či umožní dojet do servisu na vinutí druhé (samozřejmě, že celkový výkon motoru klesne zhruba na polovinu). Motor se točí až 8000 otáčkami za minutu a informace o jeho otáčkách poskytuje bezkontaktní magnetický Hallův snímač.

Energie z motorů se ke kolům přenáší převodovkou s dvoustupňovým redukčním poměrem 24:1, což motorům dovoluje pracovat efektivně od nízkých otáček. Převodovka umožňuje transportéru při maximálních otáčkách motorů dosáhnout maximální rychlosti až 20,1 km/h. Převodová kola mají šroubový profil, který eliminuje hluk převodovky na minimum. Převodovka by měla bez újmy vydržet 1600 km i za nepříznivých podmínek. Zajímavostí je, že převodová kola vydávají zvuky, které jsou od sebe vzdáleny přesně dvě oktávy a transportér při svém pohybu prakticky hraje.

Řízení obstarávají dvě identické řídicí desky, které se navzájem monitorují a v případě chyby se o řízení celého zařízení postará ta funkční z nich. Každá z nich je napojena na vlastní akumulátor, má vlastní budicí a koncové výkonové obvody, vlastní senzory náklonu a každá řídí jedno ze dvou vinutí každého motoru. Když je vše v pořádku desky pracují společně a každá dodává motorům polovinu energie.

Soubor senzorů udržujících rovnováhu vyrobených firmou Silicon Sensor Systems, je malá krychlička o velikosti hrany 7,5cm vybavená pěti gyroskopy, které využívají Coriolisova efektu pro měření rychlosti rotace. Součástí gyroskopů je vibrující prstenec. Tento prstenec při rotaci generuje energii, kterou je možno detekovat interní elektronikou snímače. Každý gyroskop je ukotven pod jiným úhlem, což umožňuje měřit několik směrů. Počítače trvale kontrolují data přicházející ze všech pěti gyroskopů a určují, zda jeden z nich neposkytuje chybná data - pokud tato situace nastane, může tuto chybu vykompenzovat daty ze zbývajících snímačů a udržet tak rovnováhu v průběhu kontrolovaného bezpečnostního vypínání systému.

Dále jsou v systému dva snímače náklonu, které jsou podobně jako lidské střední ucho naplněny tekutinou a zpracovávají údaje o zemské přitažlivosti. Každá senzorová krychlička je monitorována dvěma nezávislými procesory.

2.3 Výběr základní koncepce mého zařízení

Pro zařízení vznikající společně s psaním této diplomové práce jsem zvolil koncepci vzdáleně připomínající osobní transportér firmy Segway. Tedy dvoukolový podvozek, jehož každé kolo je hnáno samostatným motorem.

Pro ovládání pohybu do stran a k přidržování řidiče bylo zvoleno řízení pomocí řídítek podobně jako u Segway.

Jedná o stavbu prototypu, který bude sloužit jen pro studijní účely k otestování komunikace se senzory a k odzkoušení vhodného řízení otáček motorů. Není tedy nutné dodržovat patentové, či licenční ujednání, protože se nepředpokládá následný prodej zařízení vzniklého z návrhů v této práci. Taktéž nebude kladen přehnaný důraz na design zařízení. Design bude strohý, účelný a funkční.

Vzhledem k tomu, že si vše financuji sám bude kladen veliký důraz na co nejnižší cenu zařízení při dosažení dostatečné kvality a robustnosti zpracování. Zařízení tím pádem nebude mít žádné dvojité jištění, žádné dvojité baterie, ani dvojitá vinutí motorů. Půjde jen o to dosáhnout základní funkčnosti výsledného výrobku.

2.4 Výběr motorů a akumulátorů

Stejnoseměrné komutátorové motory:

Nejjednodušší motor na stejnosměrný proud má stator tvořený permanentním magnetem a rotující kotvu ve formě elektromagnetu s dvěma póly. Rotační přepínač zvaný komutátor mění směr elektrického proudu a polaritu magnetického pole procházejícího kotvou dvakrát během každé otáčky. Tím zajistí, že síla působící na póly rotoru má stále stejný směr. V okamžiku přepnutí polarity (mrtvý úhel motoru) udržuje běh tohoto motoru ve správném směru setrvačnost [1].

Otáčky takovýchto motorů se mění změnou napájecího napětí na rotoru a směr lze velice jednoduše měnit změnou polarity. Další velkou výhodou je lineární charakteristika závislosti otáček motoru na budícím napětí rotoru. Takovýto motor lze velmi snadno řídit pomocí pulzně šířkové modulace.

Neznáme ale aktuální otáčky motoru. Pro jejich měření lze použít Halovu sondu, optické snímače otáček, nebo například speciální vinutí na statoru, na kterém se bude při otáčení rotoru indukovat proud.

U těchto motorů je nutná údržba kluzných kontaktů, zpravidla uhlíkových. Při přenosu proudu uhlíky na komutátor vzniká jiskření, které může ve výbušném prostředí zapříčinit výbuch. Tyto motory jsou také oproti střídavým motorům o stejném výkonu rozměrnější.

Asynchronní střídavé motory:

Rotor se obvykle skládá ze sady vodivých tyčí, uspořádaných do tvaru válcové klece. Tyče jsou na koncích vodivě spojeny a rotor se pak nazývá „kotva nakrátko“. Tím, že se tyče rotoru (nebo vodiče vinutí rotoru) pohybují v magnetickém poli vytvářeném státorem, se v rotoru indukují elektrický proud. Frekvence magnetického pole statoru v souřadnicích rotoru je úměrná odchylce otáček rotoru od tzv. synchronních otáček. [8]

Proud tyčí rotoru v magnetickém poli statoru vyvolává sílu, která otáčí rotorem. Podle principu superpozice stačí pro hrubé odvození momentu uvažovat proudy rotoru a magnetické pole generované proudy statoru, protože samotné magnetické pole rotoru nemůže vyvolat v rotoru točivý moment. Když je rychlost otáčení rotoru rovná rychlosti otáčení magnetického pole statoru, je magnetické pole statoru v souřadnicích rotoru stacionární (tyče rotoru se vůči magnetickému poli statoru nepohybují), takže nedochází k indukci a točivý moment motoru je nulový. Z toho plyne, že když je motor alespoň minimálně zatížen, v ustáleném stavu nedosáhne ideálních otáček daných frekvencí napájecího proudu, vzniká tzv. skluz (při jmenovitém zatížení je obvykle v řádu několika procent synchronní frekvence). V běžném provozním stavu motor nedosahuje „synchronních“ otáček – proto se nazývá asynchronní motor. [1]

Vzhledem k jednoduché konstrukci, robustnosti a možnosti bez-jiskrového provedení je tento druh motoru v praxi nejběžnější, je využíván v mnoha oblastech průmyslu, dopravy i v domácnostech.

Otáčky střídavých motorů se řídí pomocí zařízení zvaného frekvenční měnič. Vyrobit toto zařízení je poměrně složité.

Výběr motorů a baterií:

Protože navrhovat frekvenční měnič je poměrně složité a cenově náročné, zvolil jsem jednodušší variantu PWM modulace pro řízení stejnosměrného motoru. Dostaly se mi do ruky dva velmi podobné napůl rozebrané čínské elektrické skútry vhodné pro děti, či důchodce. Skútry byly vybaveny stejnými stejnosměrnými motory o výkonu 250 W při 24V. Napájeny byly dvěma olověnými bateriemi Shimatsu o napětí 12V a kapacitě 12Ah. Baterie byly zapojeny do série a výrobce na jedno nabití udával při běžném terénu (četnost kopců) na běžném povrchu (asfaltová cesta) dojezd přibližně 25 km a maximální rychlost pod hranicí 30 km/h.

Rozhodl jsem se tyto dva schodné skútry použít jako dárce orgánů pro mou plošinu. Použil jsem výše zmiňované motory, baterie a nakonec pro nedostatek jiných levných možností i kola.

Olověné baterie sice nejsou nejlepší volbou, protože vzhledem ke své kapacitě mají velmi velkou hmotnost, vydrží méně nabíjecích cyklů a když se nechají úplně vybité delší dobu může dojít k jejich nenávratnému poškození. Ovšem nový kus takovéto baterie stojí zhruba 500 Kč, což je velmi příznivá cena.

3 Mechanické řešení

3.1 Volba materiálu

Čím lehčí je dopravní prostředek, tím méně energie je třeba pro jeho rozpořádání. Při volbě materiálu vhodného pro stavbu dvoukolové plošiny pro přepravu osob je třeba dbát na to, aby byl vybraný materiál co nejlehčí, ale zároveň dostatečně pevný na to, aby se při nehodě, nebo při najetí na hrbol nepokřivil, či nepopraskal.

Plastické hmoty:

Jako ideální materiál se hodí tvrzené plasty. Při vhodné tloušťce materiálu vybaveného podpurným žebrováním vznikne velmi pevný a houževnatý skelet. Pro prototyp ovšem takovýto materiál není vhodný, protože je jej potřeba vyrobít na vstřikovací lisu a to je velmi nákladné. V plastu také špatně drží šrouby a proto je třeba dopředu počítat s vyztužením plastu v místě kde bude šroub. Použití plastu jsem vyhodnotil jako nevhodné.

Lamináty:

Dalším kandidátem jsou skelná, či uhlíková vlákna, která lze poměrně jednoduše zalívat do pryskyřice a tvořit tak kompozitní materiál o velmi vysoké pevnosti, který je velmi lehký. Ideální je mít vytvořenou formu, kolem které se nabalují skelná, či uhlíková vlákna ve formě jakýchsi ob vazů. Tyto jsou namočené v pryskyřici, epoxidu, či jiné hmotě, která je vytvrdí. Po zaschnutí se hotový výrobek sundá z formy, přebrousí, vyktuje a je ho možné opatřit nátěrem. Toto je vhodné použít na výrobu lehkých krytů zařízení a při vhodné tloušťce a podpurném žebrování i pro finální korpus.

Náboje kol a další precizní součásti je ale nutno udělat na frézách a soustružích a do laminátu je buď zalaminovat v průběhu tvorby skořepiny, nebo je přichytit ke skořepině hotové. Toto je poměrně nepříjemné a pro tvorbu prototypu do kterého se bude často zasahovat spíše nevhodné. Jako velmi perspektivní se použití takového materiálu jeví při použití na hotových výrobcích, či větší zkušební sérii prototypů kterým by použití těchto materiálů snížilo oproti celokovové konstrukci hmotnost a tím dodalo na zrychlení a dojezdu.

Kovy:

Vyrobít prototyp z kovu je pro jeho snadnou obrobitelnost, velkou pevnost, pružnost a cenovou dostupnost velmi vhodné. Kovy lze jednoduše obrábět, ohýbat a svařovat. Když někde chybí díra pro šroub, jednoduše se vyvrtá a vyřeže se do ní vhodný závit. Vše jen s minimálním množstvím špon.

Jako vhodný kov jsem pro jeho lehkost vybral hliník. Je také velmi snadno opracovatelný. A pro účely prototypu dostatečně pevný. Problém nastává při jeho svařování, k tomu je třeba svářečku s ochrannou argonovou atmosférou zvanou TIG. K té mám sice přístup, ale jakmile se

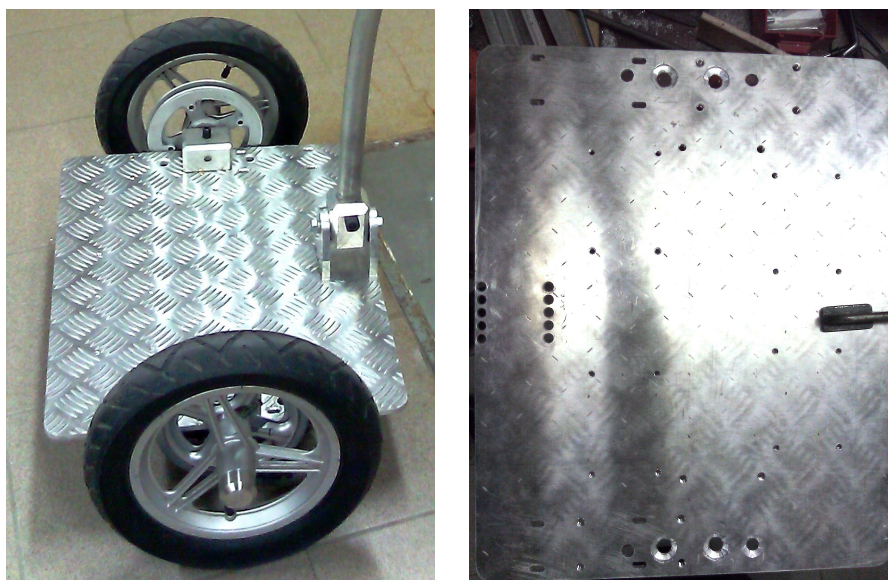
něco jednou přivaří už se to jen velmi obtížně umísťuje jinak. Proto jsem zvolil metodu šroubované konstrukce. Při řezání závitů do hliníku je třeba závitník namočit do benzínu, či lihu, jinak se hliník „lepí“ a závit je potrháný. Výhodou hliníku je také to, že ho lze použít jako chladič pro některé součástky. Dále hliník není třeba natírat ani lakovat, na jeho povrchu vytvoří tenká šedivá vrstva která hliník obalí a ten dále neoxiduje. Jediným problémem by mohly být zimní posypové soli, které by mohly hliník naleptávat. Jezdění v zimě ale nepřipadá na takovémto typu vozítka v úvahu.

Dalším kovovým materiálem, který jsem zvažoval použít byla nerez. Je ovšem velmi drahá a pro její tvrdost velmi obtížně opracovatelná.

3.2 Základní deska

Všechny hlavní komponenty jsou připevněny k základní desce. Základní deska je hlavním nosným celkem plošiny a proto musí být vhodně dimenzována. Ze spodní strany na ni budou připevněny motory, akumulátory, osy kol, řídicí desky a další elektronika. Z vrchní strany bude na základní desce jen úchyt pro říditka a plocha pro umístění nohou stojícího řidiče. Bylo by vhodné aby deska byla z vrchní strany vybavena protiskluzovou vrstvou, či nějakou formou výstupků zvyšujících bezpečné stání na plošině. Spodní strana by naopak měla být hladká pro snadnější upevnění chlazených výkonových prvků.

Jako vhodný materiál byla zvolena konstrukční hliníková deska o tloušťce 8 mm. Deska je z vrchní strany opatřena protiskluzovými výstupky a ze spodní strany je hladká. Rozměr desky byl zvolen 400 x 500 mm. Deska je dostatečně pevná aby vše bezpečně držela pohromadě a zároveň mírně pružná, takže částečně eliminuje nárazy při najetí kolem na hrbol.



Obr.3 a) Základní deska s osazenými koly a říditky b) Základní deska pohled zespoda

3.3 Uchycení kol

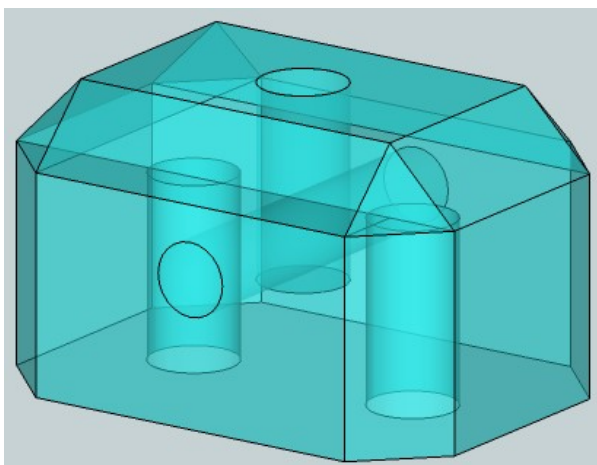
Kola jsem použil z výše zmíněných elektrických skútrů. Byla použita zadní kola skútrů, ke kterým byla výrobcem připevněna rozeta. Rozetu jsem se rozhodl použít také. Menší rozeta, (která byla taktéž zachována) byla také na motorech. energii z motoru na kolo přenáší řetěz, který je běžného typu, stejný se používá například u většiny starších jízdních kol.

Rozeta na motoru má 7 zubů a rozeta na kole má 36 zubů. Převodový poměr je tedy 7/36. To znamená, že kolo motoru se pro jedno otočení kola otočí 5,143 krát.

Osa kola byla byla uchycena na skútru z obou stran. Pro mé účely bylo třeba vymyslet, jak osu kola uchytit jen z jedné strany, tak jako u automobilu. Rozhodl jsem se tedy pro osu kola použít houževnatý materiál, který vydrží ohyb při uchycení osy kola jen na jedné straně. Osa byla vyrobena z oceli stejného průměru jako osa původní (10 mm). Na volném konci kola je osa vybavena drážkou do které se vkládá jistící pojistný kroužek. Aby se do ložisek nedostal prach je na vnější stranu náboje vyřezán závit na něž se šroubuje krycí víčko vyrobené z nerez oceli.

K uchycení kol na základní desku slouží hliníkové hranoly o rozměrech 70 x 50 x 40 mm. Pro uchycení hranolů na základní desku slouží dvě díry opatřené závity M12 na spodní straně hranolů. K základní desce se hranoly montují zápusťnými šrouby M12, které po utažení na spodní straně základní desky nevytvářejí hrboly a je přes ně možno instalovat další zařízení jako například motory. Hranoly jsou vyrobeny frézováním z hliníku. Pro finální montáž je vhodné šrouby nalepit na závitové lepidlo.

Osy kol jsou zasunuty do otvorů na boční straně hranolů. Při vrtání těchto otvorů byl kladen důraz na velmi vysokou přesnost aby nedocházelo k pohybu osy v hranolu. Osa je k hranolu zajištěna šroubem M12, který se při nasazení kola přitáhne. Pro kvalitnější aretaci je osa v místě styku s aretačním šroubem zabroušena aby styčná plocha šroubu a osy byla větší. Aretační šroub je umístěn na vrchní straně hranolu a nemá hlavičku (tzv. červík), při vhodné délce šroubu nebude šroub z hranolu vyčnívat a k jeho povolení bude sloužit imbusový klíč.



Obr.4 a) Nákres hranolu pro uchycení kol



b) Hotový hranol se zápusťnými šrouby M12

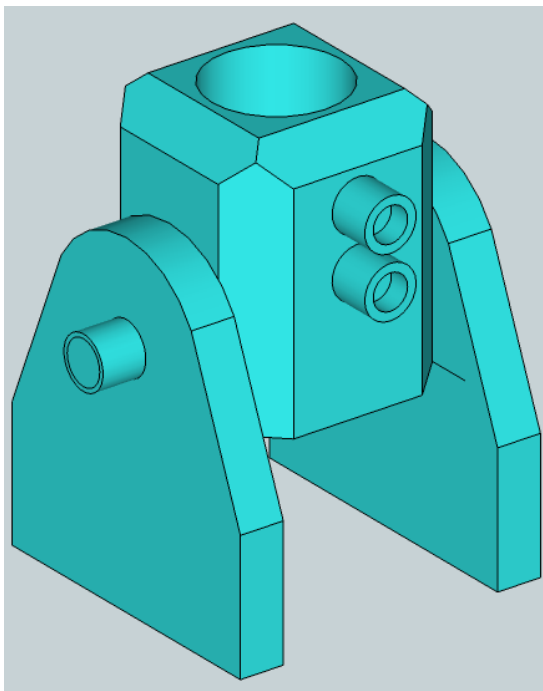
3.4 Uchycení řídítek

Na obrázku 3.a) je vidět tyč řízení uloženou v úchytu. Úchyt poskytuje možnost pohybovat tyčí řízení doprava a doleva nezávisle na základně. Po vybavení vhodným snímačem náklonu řídicí tyče budou data o náklonu tyče napravo, nebo nalevo použita k řízení směru zatáčení plošiny (rozdíl otáček motorů jednotlivých kol). Při pohybu tyče dopředu, nebo dozadu (po směru jízdy) dochází k náklonu plošiny a tím k jejímu rozpohybování vpřed, či vzad.

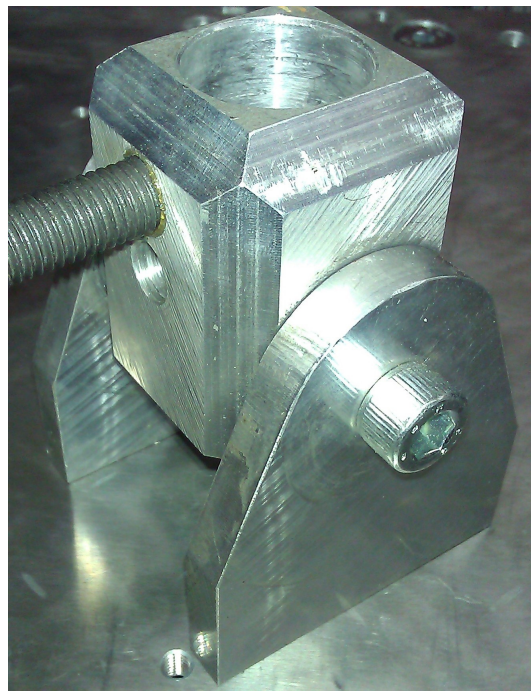
Úchyt řídítek je tvořen ze tří základních dílů. Dva jsou připevněny k základní desce a jeden je mezi nimi uchycen na pohyblivé ose. K základní desce je každá z obou částí připevněna dlouhými šrouby M8. Pohyblivá část je vybavena otvorem pro tyč řídítek, která je pro lepší přepravitelnost zařízení odnímatelná. K aretaci tyče řídítek v otvoru slouží dva šrouby M10, v řídicí tyči jsou pro tyto šrouby vyvrtány díry.

Osa pro pohyb tyčí do stran je tvořena šroubem o průměru 10 mm, který má závit až na konci a celá jeho část bez závitu slouží jako osa.

Pro dokonalost je do budoucna vhodné doplnit úchyt tyče řízení o dorazy pro stanovení maximálních výchylek a také o pružiny, které povedou ke stranám základové desky a budou tyč řízení držet v základní poloze.



Obr.5 a) Náskres úchytu řídítek



b) Hotový úchyt řídítek

3.5 Motory a převody

Motory byly ke skútrům připevněny čtyřmi šrouby M5. Toto jsem shledal nedostatečným a nahradil jsem je šrouby M8. Protože se základová deska při pohybu naklání je nutné dát nejmasivnější součásti ke středu desky (střed rovnoběžný s osou kol). Ke středu protože od středu jdou také osy kol a střed desky je tedy stále stejně vysoko nad zemí při jakémkoli náklonu.

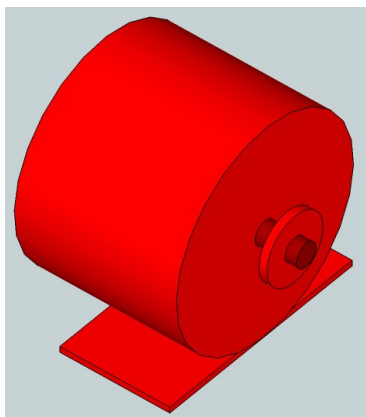
Protože se od začátku počítá s tím, že dvoukolový podvozek musí být vyvážený, umístil jsem jeden motor dopředu od osy kol, a jeden dozadu za osu, čímž došlo k ideálnímu rozložení hmotností. Nejlepší by bylo motory umístit přímo pod osu kol, to ale nebylo možné, protože by se navzájem dotýkala rozeta motoru a rozeta kola. Toto by šlo vyřešit umístěním os kol výš nad základnu, to by ovšem snížilo světlostou výšku základny od země a motory by dřely o zem. Vše by to šlo vyřešit použitím větších kol, avšak ty by bylo nutné zakoupit.

Energie z motoru se ke kolům přenáší pomocí řetězového převodu. Tento převod není nejvhodnější, protože vykazuje drobné cukání při změně směru otáček. Toto cukání je způsobeno tím, že řetěz nesedí přesně na ozubeném kole, ale má jistou vůli. Toto je způsobeno konstrukcí řetězových převodovek.

Lepším řešením by byl přímý převod z jednoho ozubeného kola na druhé, což by potřebovalo převodovou skříň s olejem (zvedla by se hmotnost), nebo ozubená kola z materiálu, který je velmi kluzný (například teflon).

Dalším řešením převodu je převod řemenový. Při vhodně napnutém řemenu nedochází k prokluzu ani u klínových řemenů s lichoběžníkovým průřezem. Ještě lepším řešením je řemen ozubený. Problémem řemenových převodů je ztrátová energie, která se na převodu ztrácí při deformaci řemene ohybem. Tato energie je větší než u řetězového převodu, protože řetěz má jednotlivé články vybavené klouby pro snadný ohyb.

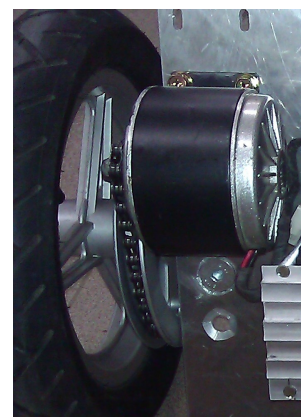
Jelikož byly jak motory tak kola vybaveny rozetami pro řetězový převod rozhodl jsem se řetězový převod i pro jeho mírné nevýhody z finančních a časových důvodů použít.



Obr.6 a) Nákres úchytu říditek



b) Použitý motor

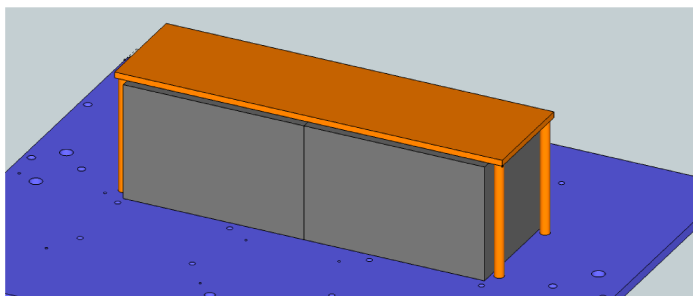


c) Motor na základové desce

3.6 Úchyt akumulátoru

Akumulátor jsem se rozhodl uchytit pomocí klece tvořené čtyřmi sloupky a krycí deskou. Sloupky jsou vyrobeny ze závitové tyče M8. Do základové desky se zašroubují tak, aby jejich vyčnívající část byla o pár desetin milimetru kratší než je výška baterie. V této poloze se sloupek zakončuje vůči základové desce maticí M8. Na opačné straně sloupku je vyvrtána díra s vnitřním závitem M4. Do těchto děr se zašroubují šrouby držící desku jež drží akumulátor. Protože je sloupek o několik desetin mm kratší než je výška akumulátoru nastane při utažení šroubů mírné napružení krycí desky, která tak drží akumulátor pevně na svém místě.

Sloupky drží akumulátor v pozici proti pohybu do boků, proti pohybu nahoru a dolů je akumulátor zafixován krycí deskou a proti pohybu do předu a dozadu jsem k fixaci využil masivnosti použitých IGBT tranzistorů a namontoval je natěsno k akumulátoru.



Obr.7 Uchycení akumulátoru k základní desce

3.7 Vyvážení podvozku

Aby podvozek při vypnutém stavu volně stál a nevyvrátil se, je ho třeba dobře vyvážit. Umístěním veškeré elektroniky, baterií a motorů, které mají nemalou hmotnost pod základovou deskou a osy kol (ty jsou nad základovou deskou) docílím toho, že při vhodném umístění těchto komponent bude vozítko v zaparkovaném stavu stát rovně i bez stojanu.

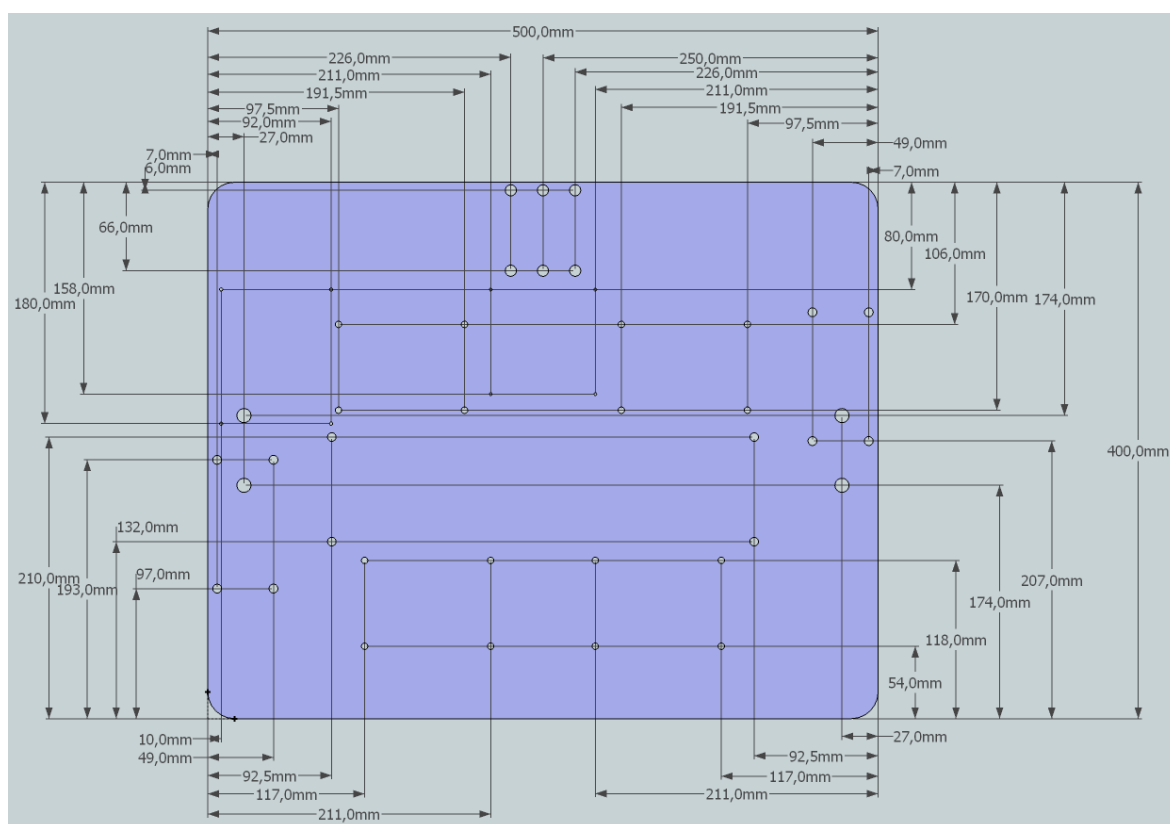
Pozice držáku řídicích páčků, úchytů kol a motorů vůči základové desce je již pevně dána. S čím ale mohu hýbat je umístění akumulátoru a IGBT tranzistorů. Motory jsou každý z jedné strany středové osy základové desky a nevytvářejí žádnou vychylující zátěž. Totéž ale nelze říct o poměrně masivním úchytu řídicích páčků a řídicích páčků samotných na přední straně vozítka – tuto odchylku je třeba kompenzovat stejnou hmotností na opačné straně plošiny.

Akumulátor je velmi těžký a k vyrovnání plošiny jej postačí dát jen mírně za středovou osu (na druhou stranu od řídicích páčků). Protože s akumulátorem souvisí i uchycení IGBT tranzistorů muselo se při vyvažování počítat i s nimi.

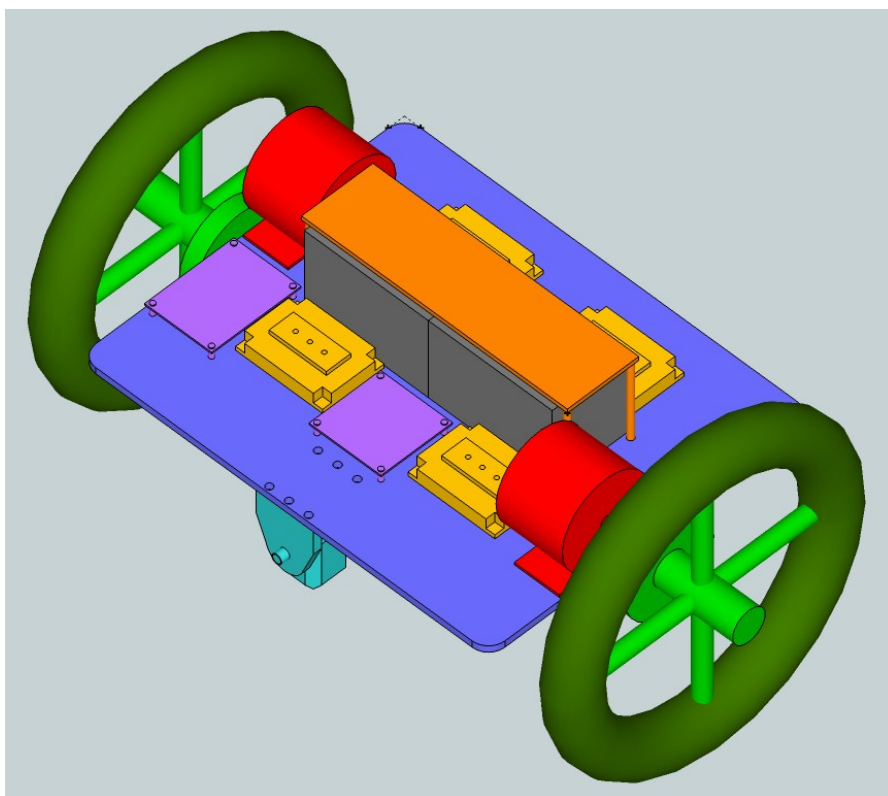
Pro dokonalé vyvážení jsem přichytil akumulátor i tranzistory k základní desce lepící páskou. Tak dlouho jsem posunoval akumulátor a tranzistory dokud nebylo vyvážení dokonalé. Poté jsem

naznačil na základovou desku všechny díry potřebné pro uchycení zbývajících součástí. Posledními chybějícími součástmi byly řídicí desky. S těmi jsem počítal v přední části a proto jsem baterii umístil ještě kousek víc dozadu aby bez elektroniky byla plošina mírně zakloněná.

Závity byly do základové desky vrtány ručně. Proti nabalování hliníku na závitník byl závitník před řezáním každého závitu namočen do technického benzínu. IGBT tranzistory drží šrouby M6, motory šrouby M8, řídicí desky drží na distančních sloupcích M3 a akumulátor je na základně držený závitovými tyčemi M8. IGBT tranzistory jsou namazány teplovodivou pastou. Detail základní desky se všemi dírami je na obr. 3 b), okótovaný náčrtek je na následujícím obr. 8. Na obrázku 9 je vidět jaká byla představa o zařízení v průběhu návrhu a na obr. 10 je vidět jak se představa přiblížila finálnímu výrobku.



Obr.8 Náčrtek pozic otvorů na základové desce



Obr.8 3D vizualizace návrhu plošiny – pohled zespoda

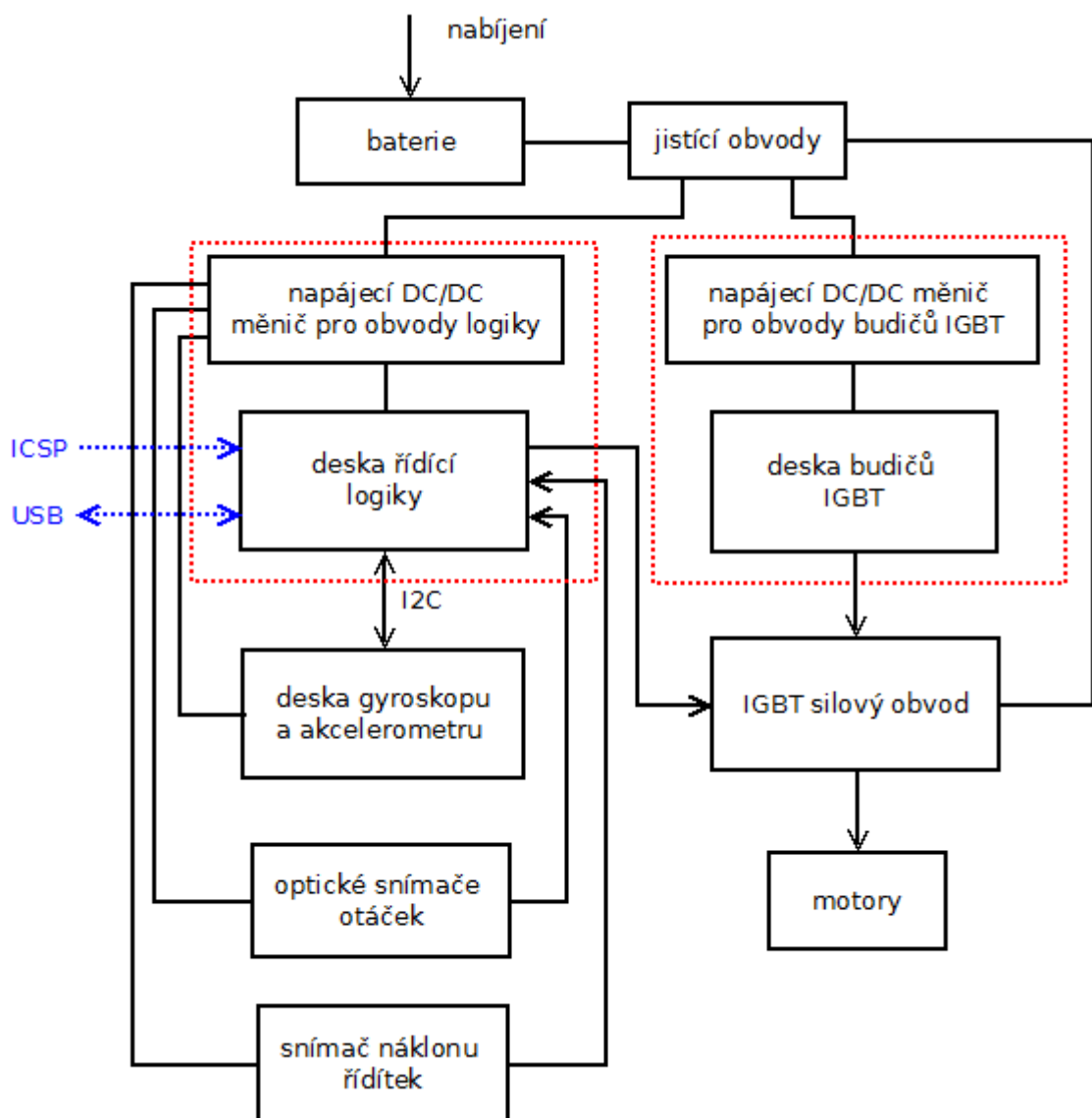


Obr.9 Osazená plošina – pohled zespoda

4 Návrh DPS a elektronického zapojení

4.1 Blokové schéma

Všechny obvody jsou napájeny z akumulátorů napětí 24V. Napájení tvoří dva akumulátory, každý o napětí 12V a kapacitě 10 Ah. Proti zkratu jsou akumulátory chráněny jistíci obvody. Řídící logika, deska gyroskopu, optické snímače otáček motorů a snímač polohy řídicích jsou napájeny proudem ze snižujícího měniče. Deska budičů IGBT tranzistorů je napájena zvyšujícím měničem. Silové obvody tvořené IGBT tranzistory napájí motory.



Obr. 10 Blokové schéma elektrického zapojení samo-vyvažovací plošiny

4.2 Jistící obvody

Pro případ zkratu na některém z obvodů je baterii třeba chránit vhodným jistícím obvodem. Pro ochranu řídicích a budících obvodů postačí ochrana pomocí pojistek. Motory mají ale každý výkon 250W, který může při záběru klidně špičkově stoupnout i na 500W. To dělá celkem 1000W zátěže. Napájecí baterie má napětí 24V, takže špičkový proud do motorů je až 41,67A.

$$I = \frac{P}{U} \quad P = \frac{1000}{24} = 41,67 A$$

Protože se jedná o špičkový proud je vhodné použít buďto 40A rychlou tavnou pojistku, nebo 20A pojistku motorovou (označena T). Další možností jištění je použití klasického domovního jističe. Z obavy o vypínání při nájezdu na hrbol nebyl tento nápad použit. Další možností jištění je nadproudová ochrana, které by automaticky odpojila baterii, k tomuto by bylo ovšem třeba vypínací relé pro proud alespoň 40A DC a to není nejlevnější. Pro finální výrobek by byla nejuvhodnější 20A pojistka typu T.

4.3 Výběr snímačů náklonu plošiny a řídicí tyče

Pro správnou funkčnost plošiny je třeba citlivých, dostatečně přesných a rychlých snímačů náklonu. Náklonoměry (inklinometry) by měly být co nejdolnější vůči rušení způsobeném jízdou po hrbolatém povrchu, náhodným vibracím způsobením rezonujícími komponenty, jízdou jednoho kola výše než druhého a jiným vnějším vlivům.

Rtuťové náklonoměry

Mezi nejstarší typ náklonoměru patří rtuťový náklonoměr. Je tvořen malým množstvím rtuti, umístěným ve zpravidla skleněné baňce vyplněné inertním plynem, nebo vakuem. Baňka je většinou ve tvaru oblouku a na její spodní části jsou přes skleněný obal vyvedeny elektrické kontakty zakončené zevnitř elektrodami. Jak se v baňce s měnícím se náklonem přelévá elektricky vodivá rtuť propojují se mezi sebou podle náklonu kontakty. Čím chceme mít přesnější náklonoměr, tím je třeba mít větší množství kontaktů na baňce. Nevýhodou těchto snímačů náklonu je jejich velmi malá odolnost proti vibracím a změnám způsobeným akcelerací.

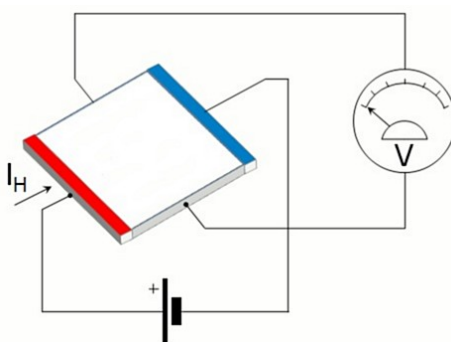


Obr. 11 Rtuťový náklonoměr se třemi kontakty

Náklonoměry magnetické

Náklon lze měřit také měřením magnetického pole. Pomocí Hallovy sondy lze zjistit intenzitu magnetického pole magnetu k sondě přiblíženého. Pokud je vše dobře nastaveno, lze rozlišit jak moc se magnet přiblížil. Pro měření náklonu dvou součástí k sobě v jednom bodě spojených stačí k jedné části připevnit magnet a ke druhé Hallovu sondu.

Hallova sonda je tvořena křemíkovou destičkou přes kterou se nechá od jednoho konce k druhému protékat proud. Po vystavení destičky magnetickému poli se vychýlí tok proudu v destičce a projeví se to změnou napětí na stranách rovnoběžných se směrem protékajícího proudu. Toto napětí se nazývá Hallovo napětí a jeho měřením lze stanovit velikost magnetického pole kterému je Hallova sonda vystavena.



Obr. 12 Princip fungování Hallovy sondy [16]

Hallovu sondu hodlám využít pro snímání polohy řídítek. Signál z Hallovy je analogový a proto ho mikropočítač převede na digitální pomocí A/D převodníku. Tuto digitální hodnotu dále použije k řízení rozdílu otáček pravého kola vůči levému.

Použití Hallovy sondy k měření náklonu plošiny vůči zemi je možné za použití kulového magnetu plujícího v trubičce tvaru oblouku naplněné kapalinou (olejem). Kapalina je použita pro zamezení skákání kuličky vlivem vibrací, či rychlých změn akcelerace. Nevýhodou je pomalost takového snímače, která je s přibývajícím hustotou kapaliny stále větší. Další možností je zavěsit magnet na kyvadlo, ale tam je rušení vlivem vibrací ještě mnohem větší.

Měření náklonu pomocí dálkoměrů

Měření náklonu základní desky vozítka lze velmi přesně a rychle měřit pomocí dálkoměru umístěného v přední, či zadní části plošiny. Dálkoměr je namířen směrem dolů a měří vzdálenost přední, nebo zadní části desky od země.

Senzory bývají infračervené, laserové, či ultrazvukové. Na trhu lze zvolit velmi přesné a rychlé senzory. Jejich nevýhodou je, že nefungují spolehlivě na všech materiálech. Kdysi jsem se podílel na vývoji pomůcky pro slepce založené na dálkoměrech a po sériích testů v terénu se jako nejvhodnější ukázaly dálkoměry na infračervené bázi. Bylo ale nutné jejich krytí před přímým sluncem a i za použití modulovaného signálu IR diody nastalo občasné rušení a některé povrchy IR

záření pohlcovaly, nebo odrážely mimo přijímač.

Použití IR dálkoměru pro měření náklonu plošiny by bylo vhodné za předpokladu, že by plošina jezdila stále po stejném druhu povrchu a senzory by byly pro jistotu zdvojeny, či strojeny. Jako vhodné vidím například betonové podlahy velkých skladů či hal. Pro použití v běžném exteriéru toto ovšem nepřipadá v úvahu. Další nevýhodou jsou kanály, skleněné, či z pletiva vytvořené podlahy mostů, či nájezdů ve kterých se IR signál buď ztratí, nebo nahlásí chybnou hodnotu vzdálenosti.

Akcelerometry

Akcelerometr je zařízení, které je schopno měřit zrychlení, tj. měří odstředivé a dostředivé setrvačné síly působící na akcelerometr, dále je možné s ním měřit vibrace. Stále na něj působí síla zemské tíže, která působí na zemi vždy směrem ke středu planety, díky tomu lze pomocí akcelerometru měřit také náклон. Akcelerometry se dnes hojně používají pro měření náklonu například v mobilních telefonech a chytrých multimediálních ovladačích televizorů a videoher.

Tyto malé integrované akcelerometry jsou tvořeny technologií MEMS (Micro Electro Mechanical Systems), která je převážně na křemíkové bázi a umožňuje vyrábět velmi malé součástky za velmi příznivé ceny. Akcelerometry vyrobené touto technologií jsou umístěny převážně v pouzdrech typu SMD pro povrchovou montáž. Jsou tedy velmi malé.

Princip jejich funkce je ve většině případů založen na měření kapacity dvou kondenzátorů. Každý má pevně uchycenou jednu elektrodu a oba mají společnou elektrodu prostřední, která je pohyblivá. Změnou vzdáleností elektrod se mění vlastnosti dielektrika a lze určit náклон, či zrychlení.

Akcelerometry jsou při měření náklonu velmi náchylné na rušení způsobené vibracemi a je nutné je vhodně filtrovat.

Dnešní integrované akcelerometry jsou buďto s analogovým výstupem, kdy výstupní napětí odpovídá akceleraci, nebo digitální, komunikující po sériové komunikační sběrnici (převážně I2C).

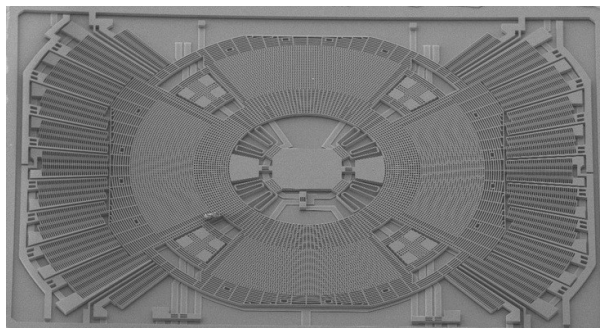
Gyroskopy

Gyroskop je zařízení tvořené kruhovým setrvačником, jehož hmota je rozložena k vnějšímu okraji. Má proto většinou tvar rotujícího prstence. Mezi fyzikální vlastnost gyroskopu patří to, že si snaží zachovat svou aktuální pozici a pro změnu této pozice je třeba vnější síly. Pokud by jsme tedy roztočený gyroskop umístili ve vakuu do rakety tak, aby nebyl by nijak připevněn ke stěnám rakety, byl by pořád ve stejné pozici jako při roztočení nezávisle na natočení rakety. Tohoto jevu se využívá například v navigačních systémech letadel pro vytvoření umělého horizontu.

Protože se gyroskop točí a na zemi není v ideálním prostředí dochází k takzvanému driftu, při kterém se osa gyroskopu pomalu pohybuje. Gyroskop je ale velmi stabilní při měření náhlých změn pozice zařízení na kterém je připevněn.

Gyroskopy se také vyrábějí technologií MEMS jako integrované obvody. Tyto obvody ale

nejsou tvořeny rotujícím prstencem, nýbrž vibrujícím diskem. Disk je většinou tvořen z křemíku a je rozvibrován piezo elektricky. Tento disk je zavěšen na pružinách. Takto vibrující disk vykazuje podobné vlastnosti, jako rotující gyroskop. Není ovšem tak stabilní a vykazuje vyšší drift.



Obr. 13 Vnitřní struktura MEMS gyroskopu [17]

Kombinace gyroskopu a akcelerometru

MEMS akcelerometry jsou schopny velmi přesně dodávat informace o náklonu, ale jsou velmi náchylné na vibrace, kdežto gyroskopy jsou oproti vibracím velmi odolné, ovšem z při dlouhodobém měření vykazují drift. Ideální je použít data z akcelerometru a jako korekci použít gyroskop. Pro tyto účely začali výrobci dávat akcelerometry a gyroskopy do jednoho integrovaného pouzdra.

Tyto zařízení komunikují většinou po sběrnici I2C. Data, které dodávají jsou však oddělená pro gyroskop i pro akcelerometr a jejich sloučení a korekce je třeba provést v mikropočítači, který tyto údaje čte. Toto je poměrně komplikované jak z hlediska matematického, tak z hlediska výpočetního výkonu mikropočítače, který korekce počítá.

Ideálním řešením by bylo zařízení, které by už korekce počítalo a zároveň sloučilo signály z gyroskopu a akcelerometru do jednoho, včetně odstranění šumů, vibrací a nežádoucích jevů, které mohou při měření náklonu nastat. Takovéto zařízení existuje, vyrábí ho firma IvenSense pod názvem MPU 6050. Tento snímač jsem se rozhodl použít, protože dle popisů na webu výrobce a podle datasheetů obsahuje právě jednotku, která dodává již filtrované sloučené údaje z akcelerometru a gyroskopu.

4.4 IvenSense MPU 6050 – deska gyroskopu a akcelerometru

MPU 6050 firmy IvenSense je čip, který obsahuje tři osy gyroskop, tři osy akcelerometr a takzvaný DMP (digital motion procesor unit). Zařízení je schopno až takzvané devíti osé fúze. Toto znamená, že integrovaná DMP jednotka je schopna provést sloučení údajů z tří osého gyroskopu, tří osého akcelerometru a po I2C sběrnici připojeného tří osého magnetometru. Magnetometr je zařízení měřící pozici magnetického severu, jde tedy o elektronický kompas. Tyto údaje jsou DMP čipem zpracovány a lze je přímo použít připojeným mikropočítačem, kterému je takto podstatně odlehčeno na výpočtech.[10][11]

Pro mé zařízení jsem zvolil tzv. evaluation board verzi MPU 6050. Tato verze dodávaná firmou IvenSense sestává z malého plošného spoje, na kterém je již MPU 6050 osazen. Dále je osazen magnetometr a další podpůrné napájecí obvody. Deska je také vybavena propojkami pro snadné nastavení napájecích úrovní (TTL, nebo 3,3V) a konektorem obsahujícím vývody čipu pro jednoduché připojení k dalším obvodům.

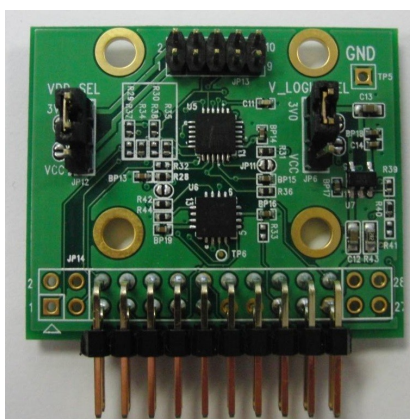
Deska je napájena napájecím obvodem pro napájení logiky (viz obr. 10). Je použit mikropočítač jehož napájecí napětí je 3,3V a napájecí obvod logiky má tedy výstup 3,3V. Takže je na desce s MPU 6050 třeba vhodně nakonfigurovat propojky. Pro použití na desce integrovaného stabilizátoru 3,0V je třeba napájecí napětí 3,7V a vyšší, 3,3V dodávané napájecím obvodem pro napájení logiky je tedy málo. Nastavením propojky JP6 a JP12 podle tabulky tab. 1 je nutné provést nastavení pro externí napájení (na desce integrovaný stabilizátor není použit).

JP6 číslo pinu	popis
1-2 propojen	napájeno z int. stabilizátoru ... U napájecí > 3,7V
2-3 propojen	napájeno externě ... $2,1V < U_{\text{napájecí}} < 3,6V$
JP12 číslo pinu	popis
1-2 propojen	napájeno z int. stabilizátoru ... U napájecí > 3,7V
2-3 propojen	napájeno externě ... $2,1V < U_{\text{napájecí}} < 3,6V$

Tab. 1 Nastavení napájecích úrovní MPU 6050 evaluation board

Desku lze k dalším obvodům připojit pomocí sériové sběrnice SPI, nebo I2C. Zvolil jsem připojení pomocí dvou vodičové sběrnice I2C. MPU 6050 dokáže po I2C sběrnici komunikovat na frekvenci až 400 kHz.

Většina zařízení komunikujících po sběrnici I2C je typu open drain. To znamená, že pro správnou funkci sběrnice je třeba použít pull-up rezistory. Rezistor se zapojuje k napájecímu napětí, v tomto případě k 3,3V. Výrobce evaluation desky použil rezistory o odporu 10 kΩ. Protože jsou pull-up rezistory osazeny na evaluation desce, není je třeba osazovat na desce řídicí logiky. Celé evaluation deska je tedy k desce řídicí logiky připojena pomocí čtyř vodičů, kdy dva jsou napájecí a dva jsou datové vodiče I2C.



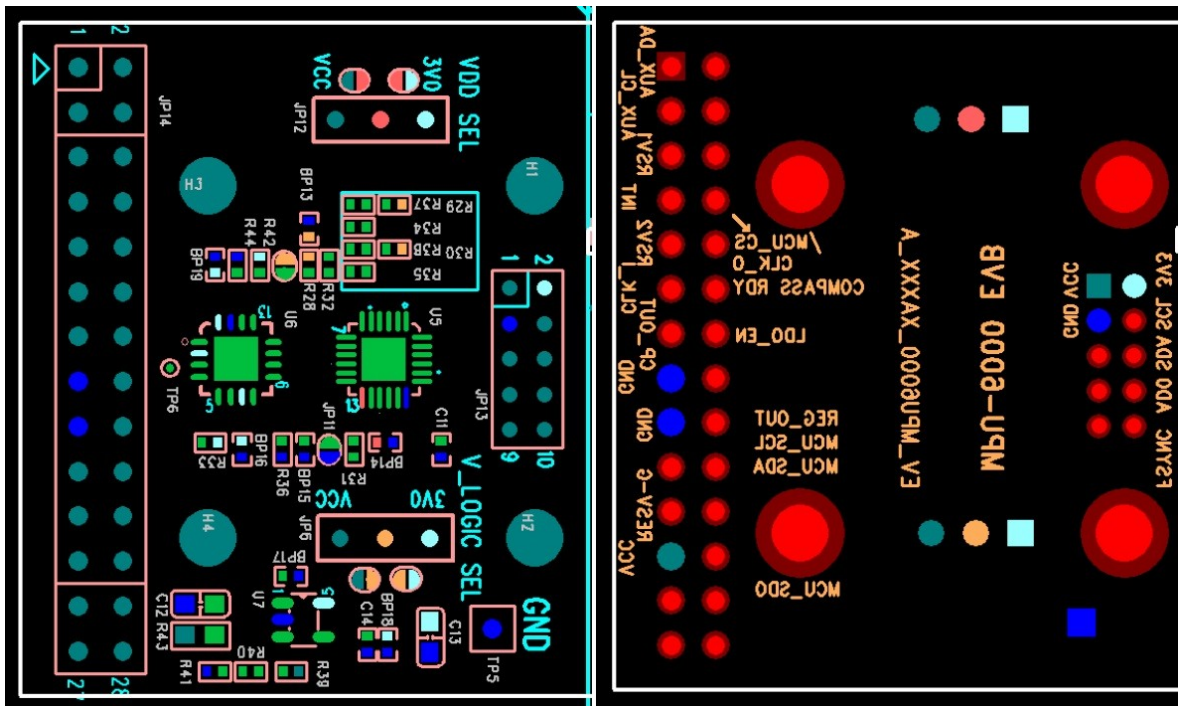
Obr. 14 MPU 6050 evaluation board - velikost obrázku cca. 1:1[11]

Vývody z čipu MPU 6050 jsou na desce vyvedeny na dva konektory. Jeden 28-mi pinový (JP14) je již osazen konektorem. Druhý 10-ti pinový (JP13) je určen k připojení vodičů. Zvolil jsem připojení vodičů přímo na desku a opačnou stranu vodičů jsem vybavil konektorem, který se připojí do desky řídicí logiky. Vodiče jsou připojeny dle tab. 2. Napájení na pin 1 a 3, I2C komunikace na piny 4 a 6.

JP13 číslo pinu	popis
1	VCC
2	3V z interní reference
3	GND
4	MPU 6050 I2C SCL
5	NC
6	MPU 6050 I2C SDA
7	NC
8	MPU 6050 I2C FSYNC
9	NC
10	MPU 6050 I2C FSYNC

Tab. 2 Rozložení pinů konektoru JP13 MPU 6050 evaluation board

Rozmístění součástek, zkratovacích propojek a konektorů na desce plošných spojů je na obr. 15. Schema zapojení evaluation board je v příloze A.1.



Obr. 15 Rozmístění součástek na desce plošných spojů MPU 6050 evaluation board [11]

4.5 Napájecí DC/DC měnič pro obvody logiky

Akumulátory dodávají proud o napětí cca 24V. Toto napětí je však pro napájení logických obvodů velmi vysoké a je třeba ho efektivně snížit. Pro napájení logiky jsem původně zvažoval běžnou úroveň 5V pro logické obvody (TTL). Mikropočítač nakonec zvolený je ale modernější a využívá napájecího napětí 3,3V.

Při použití lineárního stabilizátoru by byla napěťová ztráta 20,7V. Při proudu 500 mA by se na stabilizátoru vyzářilo 10,35 W ztrátového tepla, což je poměrně mnoho.

$$P = U \cdot I \quad P = (24 - 3,3) \cdot 0,5 = 10,35 \text{ W}$$

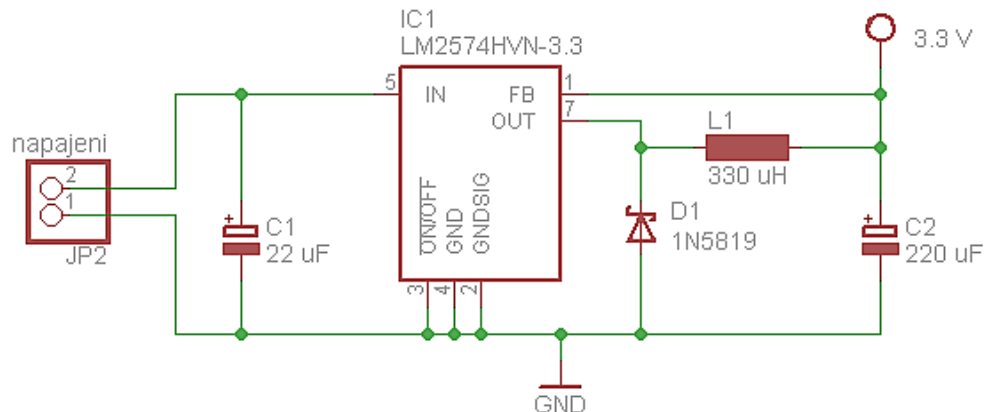
Zvolil jsem proto konstrukčně trochu složitější stabilizaci pomocí snižujícího měniče. Použit byl obvod LM2574 3.3. Při použití měniče je účinnost větší než 85%, je tedy mnohem účinnější než stabilizátor lineární. LM2574 3.3 může dodávat stabilní napětí 3,3V o proudu až 0,5A při vstupním napětí maximálně 40V a to vše bez nutnosti chlazení.

Proud z akumulátoru je připojen na svorky konektoru JP2 a před samotným regulátorem je kondenzátor C1 sloužící pro vyhlazení proudových špiček. Obvod měniče je tvořen cívkou L1 a diodou D1, k vyhlazení výstupního proudu slouží kondenzátor C2.

Napájecí DC/DC měnič pro obvody logiky je umístěn na jedné desce plošných spojů společně s obvodem logiky. Obvod je zasazen v patici pro pouzdro DIL8. Kondenzátory C1, C2 a cívku L1 jsem zvolil v radiálním provedení.

Seznam součástek:

C1	22 μ F / 63V
C2	220 μ F / 16V
L1	330 μ H / 1A
D1	1N5819 shottky
IC1	integrováný regulátor 3,3V LM2574HVN-3,3
JP1	dvojitá svorkovnice do DPS (rozteč 5 mm)



Obr. 16 Schema zapojení snižujícího měniče 3,3V

4.6 Měření rychlost otáček kol

Vzhledem k linearitě průběhu otáček použitých stejnosměrných motorů zřejmě nebude potřeba otáčky kol měřit, ale je lepší počítat s možností, že tato eventualita nastane a navrhnout vhodné způsoby měření. Dále je vhodné se zvolenými snímači počítat i na desce řídicí logiky a tuto pro ně vybavit předpřipraveným konektorem.

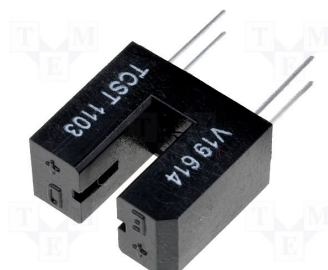
Pro měření otáček lze použít Hallovy sondy, optické snímače otáček, nebo například speciální vinutí na statoru na kterém se bude při otáčení rotoru indukovat proud. Měřit lze buďto otáčky motoru, nebo přímo kola. Při převodu do síly, který je zde použit je rychlost otáček motoru vyšší, takže při měření celých otáček přímo na motoru dosáhneme vyšší přesnosti měření nežli na kole, které se točí pomaleji.

Pro snímání pomocí Hallovy sondy je nutné osu motoru vybavit magnetem. Při každé otáčce se magnet bude přibližovat k Hallově sondě a jakmile napětí na ní překročí komparační úroveň nastavenou na komparátoru umístěném na řídicí desce započte se v programu mikropočítače jedna otáčka. Hallovu sondu jsem již podrobně popsal v kapitole 4.3.

Obdobně by to fungovalo s optickým snímačem otáček jen s tou změnou, že by se do osy motoru vyvrtala díra skrze kterou by procházel paprsek snímače. Takové měření by bylo dvakrát tak přesné jako u Hallovy sondy, protože by paprsek prošel při jednom otočení dvakrát – pokaždé z jiné strany díry. Lepším řešením než provrtání osy motoru, které výrazně snižuje její pevnost je použití děrovaného disku, který se připevní na osu motoru a při průchodu paprsku dírkami se bude měřit čas mezi nimi. Čím více dírek v disku bude tím rychleji budou změny otáček rozpoznány.

Nejlepším řešením je namísto děrovaného disku použít přímo mezer mezi zuby ozubených kol. Ozubená kola ovšem nejsou magnetická a i když jsou částečně zmagnetizovaná motorem bylo by jejich snímání pomocí Hallovy sondy obtížné. Lepší je měření pomocí optiky.

Protože je k ozubenému kolu motoru špatný přístup rozhodl jsem se umístit optický snímač k zubům na rozetě kola. Příprava bude provedena rovněž na desce řídicí logiky, na které bude konektor. Z konektoru bude snímač v podobě optické závory napájen a zároveň k němu bude připojen i fototranzistor. K připojení optické závory k desce řídicí elektroniky tedy bude třeba jen čtyřvodičový kablík vybavený konektorem. Pokud bude optická závora použita, použiji závoru TCST1103 dodávané firmou Vishay Semiconductor do jejíž mezery se akorát vejde šíře ozubeného kola.



Obr. 17 Optická závora TCST1103

4.7 Deska řídicí logiky

Na desce řídicí logiky jsou konektory, ke kterým se připojují všechny periferní obvody. Celé zařízení je tedy modulární a při poruše se vymění jen vadný modul.

Výběr mikropočítače

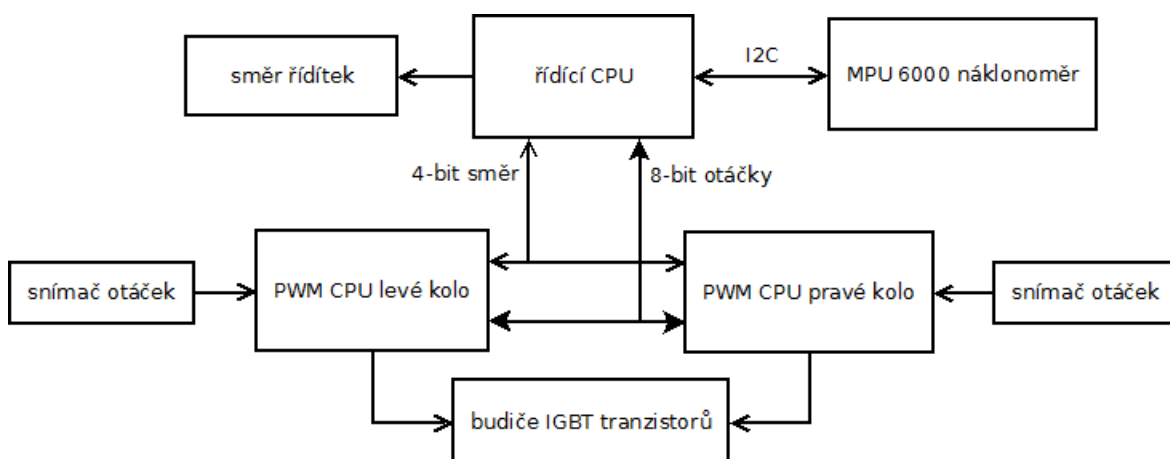
Protože mám zkušenosti s mikrokontroléry PIC firmy Microchip rozhodl jsem se je použít i v tomto případě. Je třeba ovládat otáčky dvou motorů pomocí pulzně šířkové modulace. Získávat data o natočení řídicí tyče (A/D převodník) a pro případ nutnosti číst informace o otáčkách kol z optických snímačů.

Dále je vhodné desku vybavit ICSP portem pro sériové programování za běhu. Výhodou ICSP konektoru je to, že pro nahrání nového programu odpadá nutnost vyjmutí mikropočítače z patice a jeho opětovné instalace zpět po nahrání programu. Životnost patice mikropočítače není velká a při častém vyjímání mikropočítače se patice rychle kazí. Taktéž při použití ICSP šetříme čas, protože sériové programování je poměrně rychlé.

Řízení třemi mikropočítači

Původně jsem chtěl vytvořit řešení sestávající ze tří mikropočítačů. Dva stejné by řídily každý jeden motor pomocí pulzně šířkové modulace. Otáčky by udržovaly na základě údajů ze snímačů otáček. Tyto dva mikropočítače by měly připojenou osmibitovou sběrnici, na kterou by řídicí mikropočítač posílal rychlost otáček kol, kterou je třeba udržovat. Jakmile by se na sběrnici objevila změna každý mikropočítač by individuálně nastavil rychlost otáček kol dle dat na sběrnici a tuto rychlost by automaticky udržoval.

Dále by byla druhá čtyřbitová sběrnice, která by byla taktéž zapojena mezi všechny tři mikropočítače. Tato druhá sběrnice by sloužila k řízení rozdílu otáček mezi pravým a levým kolem a data na ni by rovněž posílal řídicí mikropočítač. K řídicímu mikropočítači by tedy byly připojeny dvě sběrnice, senzor natočení řídítek a po I2C sběrnici deska MPU 6050 pro měření náklonu.



Obr. 18 Blokové schéma realizace řídicí desky pomocí tří mikropočítačů

Řízení jedním mikropočítačem

Prohledával jsem katalogy a našel jsem mikropočítač PIC18F26J50. Tento mikropočítač mimo jiné obsahuje dva PWM moduly schopné řídit full bridge – tedy celý H most (H most je podrobně popsán v kapitole obvodu budičů IGBT). Toto je velmi vhodné, protože použitím těchto modulů odpadne potřeba použití tří mikropočítačů a postačí jen jeden. Navíc tento mikropočítač obsahuje modul pro sériovou komunikaci po sběrnici I2C, integrovaný USB modul, A/D převodníky a další obvody. Samozřejmě obvodu nechybí možnost sériového programování za běhu ICPS. [7]

Oproti použití tří mikropočítačů je zapojení s jedním mikropočítačem konstrukčně jednodušší, má menší spotřebu elektrického proudu, je levnější a předpokládám třikrát menší riziko poruchy oproti řešení se třemi mikropočítači. Jediným nedostatkem jednoprocessorové konstrukce je mírně složitější program, který musí zahrnout řízení rychlosti otáček obou motorů.

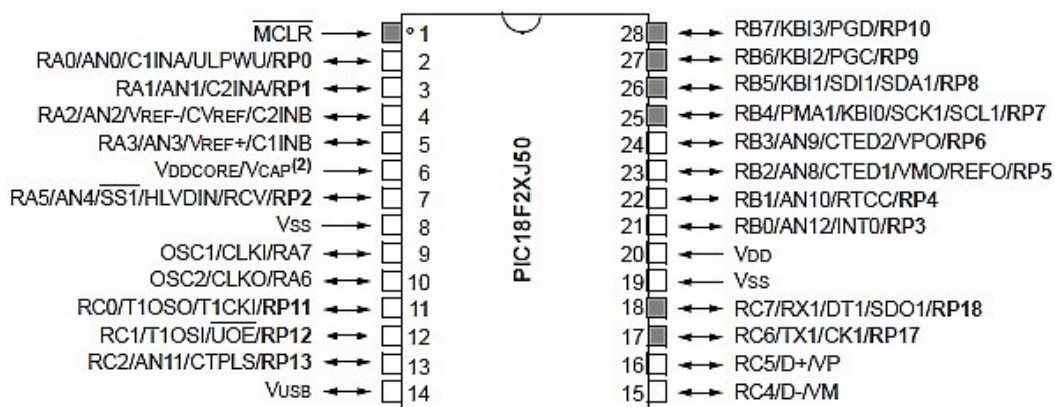
Protože výhody použití jednoho mikropočítače oproti konstrukci se třemi mikropočítači předčily nevýhody, rozhodl jsem se použít řešení s jedním mikropočítačem.

Popis desky řídicí logiky

Na desce řídicí logiky je obsažen také napájecí DC/DC měnič pro obvody logiky (popsán v kapitole 4.5).

Hlavní součástí desky řídicí logiky je mikropočítač PIC18F26J50 firmy Microchip. Zvolil jsem verzi v pouzdru DIL, kterou osadím do precizní patice. PIC18F26J50 má 28 vývodů. Mikropočítač má paměť typu flash s kapacitou 32 kB, kterou lze až 10000 krát přepsat.

Další vlastností mikropočítače jsou tzv. remapovatelné piny. Jedná se o 16 pinů, ke kterým lze libovolně přidělit výstupy jednotlivých modulů mikropočítače, které toto přidělení podporují. Toto značně ulehčuje návrh desky plošných spojů, protože díky remapovatelným pinům máme více možností pro rozmístění součástek přilehlých k mikropočítači. Remapovatelné piny jsou označeny jako RP_x.



Obr. 19 Popis výstupních pinů mikropočítače PIC18F26J50 [7]

Napájení 3,3V z měniče pro napájení logiky je přivedeno k pinům 8 a 20. Na desce plošných spojů je velmi blízko k vývodu 20 umístěn filtrační kondenzátor C3 o kapacitě 100 nF, sloužící k odfiltrování vysokofrekvenčních špiček, které by se mohly na napájení objevit díky PWM modulaci.

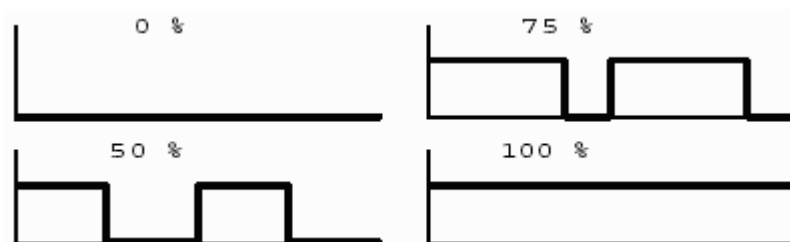
USB port X1

Pro případ budoucí nutnosti propojit plošinu s počítačem za účelem ladění, přeposílání dat a podobně jsem se rozhodl použít USB port. Mikropočítač má integrovaný USB modul schopný komunikovat jak USB1, tak i USB2 standardem. Datové piny USB konektoru typu B (X1.2 a X1.3) jsem připojil k vývodům 15 a 16 (D+ a D-) mikropočítače, GND z USB konektoru (X1.4) je spojena se zemí a 5V (X1.1) je připojeno na pin č. 14. Dle datasheetu je použit pull-up rezistor R1 o odporu 1,5 kΩ zapojený mezi D+ a 5V.

PWM modulace – konektory X5 a X6

Výkonové tranzistory mají nejvyšší účinnost jen ve dvou stavech a to ve vypnutém a v maximálně otevřeném. Pro minimalizaci ztrát je tedy vhodné použít je jako spínače. Když potřebujeme tranzistorem účinně řídit proud tekoucí zátěží lze to realizovat pomocí pulzně šířkové modulace.

PWM modulace funguje tak, že proud tekoucí do zátěže rozkmitáme tranzistorem na vysokou frekvenci, která je v průběhu regulace konstantní. Pomocí změny délky pulzů můžeme jednoduše regulovat proud protékající zátěží. I když máme na místo stejnosměrného proudu najednou proud pulzní, je tento pulzní proud díky vysoké frekvenci vnímán jako stejnosměrný. Pro lepší vyhlazení je vhodné paralelně k zátěži umístit vyhlazovací kondenzátor. Ideální pulzně modulovaný signál má obdélníkový průběh.



Obr. 20 Ukázky průběhu proudu při PWM modulaci s 0, 50, 75 a 100% šířkou pulzu

PWM moduly mikropočítače jsou schopny pracovat v několika režimech, jedním z nich je i takzvaný Full-Bridge mód. V tomto módu řídí každý modul 4 tranzistory, tedy celý H most, což je výborné pro řízení rychlosti a směru otáček stejnosměrných motorů. Počítám s frekvencí zhruba 500 Hz. Výstupy jednotlivých PWM modulů jsou mapovatelné a počítám s namapováním dle schématu na konektory X5 a X6. Žádné další přídavné obvody na desce logiky nejsou, buzení IGBT tranzistorů je řešeno na desce budičů IGBT.

Signalizační diody LED1 a LED2

LED diody LED1 a LED2 jsou napojeny na RC7 a RC6 mikropočítače. Jsou použity červené diody. Při napětí 2,5V přes ně teče proud 2 mA. Napájecí napětí je 3,3V, je ho tedy třeba snížit o 0,8V. K tomu slouží rezistory R8 a R9 o hodnotě 400Ω, odpor je záměrně vyšší, aby diody nesvítily příliš intenzivně. Využití LED diod je pouze pro účely ladění programu, použil jsem je například jako indikátor správně nastavených PWM modulů kdy měnily intenzitu jasu.

$$U_R = U_{CC} - U_{LED} \quad U_R = 3,3 - 2,4 = 0,8 V \quad R = \frac{U}{I} \quad R = \frac{0,8}{0,002} = 400 \Omega$$

ICSP programování – konektor X3

Pro programování mikropočítače za běhu se používá ICSP programátor. Já používám programátor Presto české firmy Asix. ICSP konektor je zapojen dle datasheetu mikropočítače a návodu k programátoru Presto.

- Na pin X3.1 je přivedeno napájení aby programátor věděl, zda je zařízení mikropočítač připojen na napájení.
- Pin X3.2 je připojen na GND.
- Pin X3.3 ovládá reset mikropočítače.
- Pin X3.4 PGD programovací signál.
- Pin X3.5 PGC programovací signál.
- PIN X3.6 nezapojený.

Natočení řídicíků – konektor X9

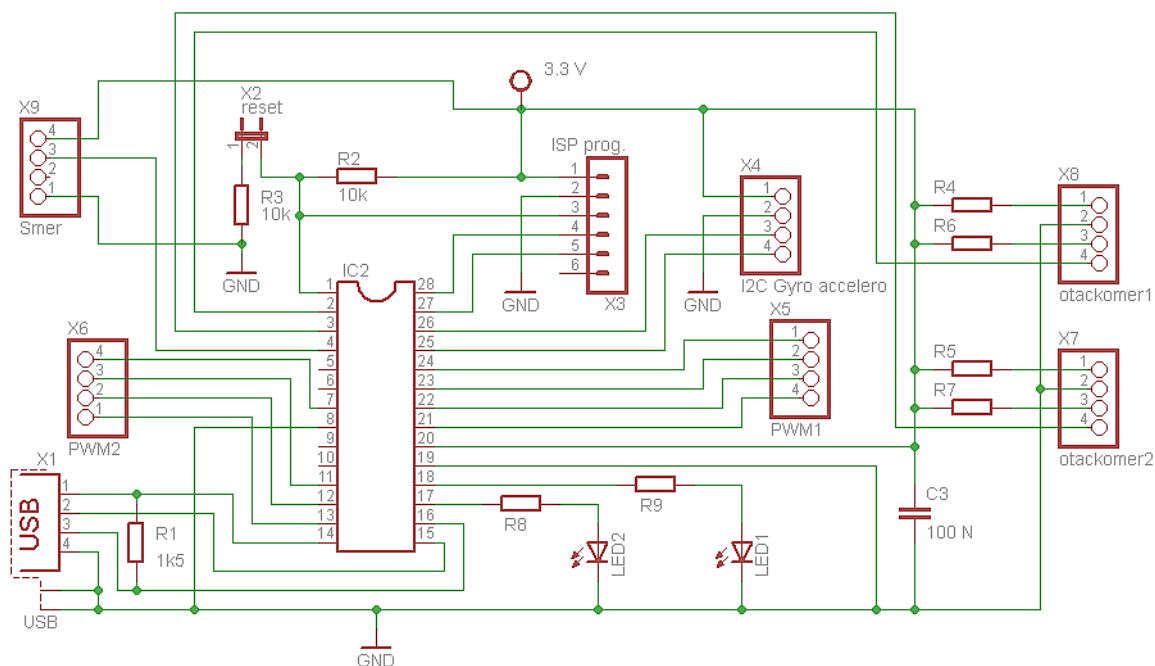
Analogová data o směru natočení řídicíků pocházející z Hallovy sondy jsou přivedena na pin X9.2. Pin X9.4 a X9.1 slouží k napájení Hallovy sondy. Rezistor pro omezení proudu protékajícího hallovou sondou je umístěn na malé desce plošných spojů Hallovy sondy. Analogová data jsou připojena na port RA2 mikropočítače, který bude použit jako vstup A/D převodníku.

Reset – konektor X2

Zapojení resetu je podle datasheetu a je funkční. Kdybych nepoužil datasheet, tak bych nepoužil rezistor R3 a připojil bych pin X2.1 přímo k zemi. Na konektor X2 není připojen žádný spínač, slouží jen pro účely ladění. Mikropočítač se resetuje přiložením šroubováku k pinům konektoru X2, nebo z PC pomocí připojeného ICSP programátoru.

Otáčkoměry – konektory X6 a X7

Otáčkoměry se připojují na konektory X6 a X7. Není s nimi ovšem počítáno a rezistory k omezení proudu závor nejsou spočítány. Jejich hodnoty by se zvolily až podle měření tak aby optickou závorou protékal co nejmenší proud a ona zároveň spolehlivě fungovala.



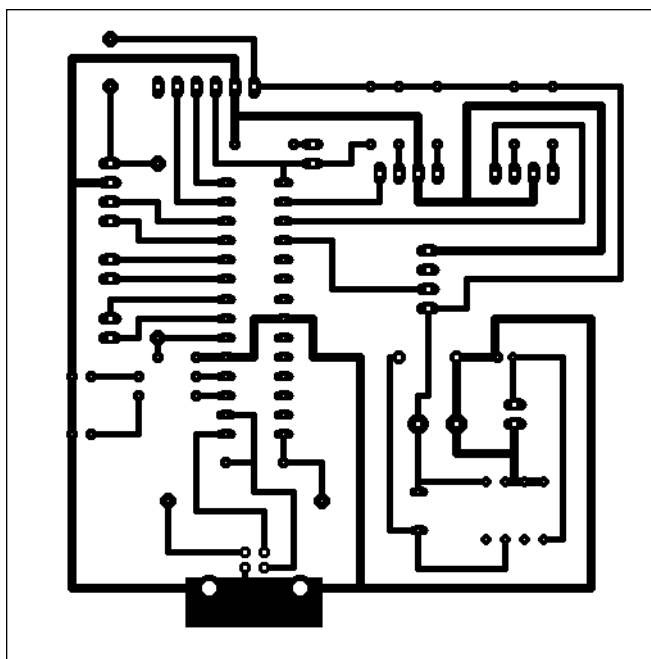
Obr. 21 Elektrické schéma desky řídicí logiky (bez napájecí části)

Seznam součástek:

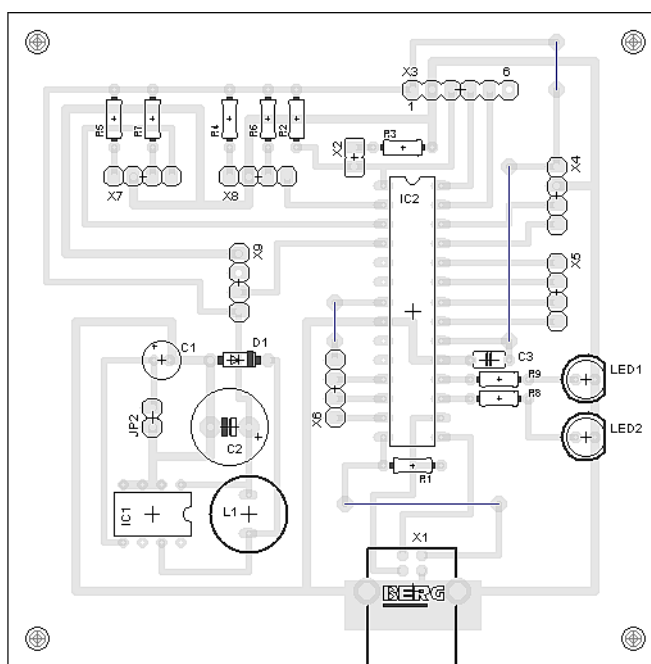
R1	1k5 / 0,7W
R2,R10	10k / 0,7W
R8,R9	200R / 0,7W
R4-R7	zatím nepoužito
LED1,LED2	L-53LSRD
C3	100nF / 16V
X1	konektor USB-B do dps, USB1X90B PCB
X2	oboustranný kolík XINYA S1G20 2,54mm, použity 2 piny
X3	oboustranný kolík XINYA S1G20 2,54mm, použito 6 pinů
X4-X9	konektor se zámkem XINYA PSH02-04PG, 4-pinový
IC2	Microchip PIC18F26J50 + patice DIL28PZ 7,5mm

Deska plošných spojů

DPS řídicí logiky je vyrobena fotocestou. Snažil jsem se ji vyrobit tak aby byla jednostranná, čehož jsem docílil za cenu použití tří propojů. Na desce jsou osazeny obvody řídicí logiky a obvod pro napájení řídicí logiky. Deska je k základové desce vozítka připevněna na třech distančních sloupcích M3 o délce 12mm.



Obr. 22 Deska plošných spojů řídicí logiky – strana spojů



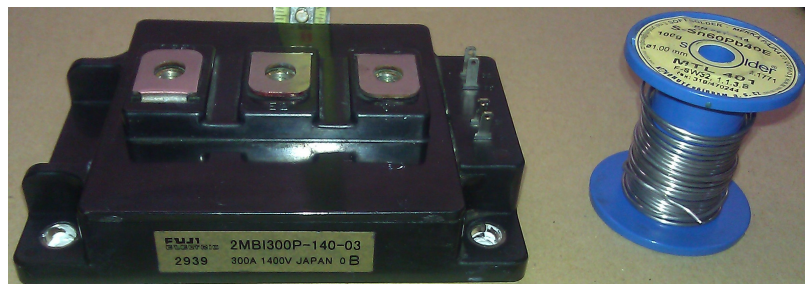
Obr. 23 Deska plošných spojů řídicí logiky – rozmístění součástek

4.8 IGBT silový obvod – dvojitý H most

Otáčky motorů je třeba efektivně řídit pomocí PWM modulace. Motory mají každý jmenovitý výkon 250W, při rozběhu lze počítat s nárůstem příkonu. Protože do budoucna zvažují motory nahradit silnějšími 500W, je třeba počítat se špičkovým příkonem kolem 650W. Při 24V vyjde proud 27A na motor. Tomu by měly odpovídat spínací prvky, ty je také třeba mírně naddimenzovat ideálně na 40A.

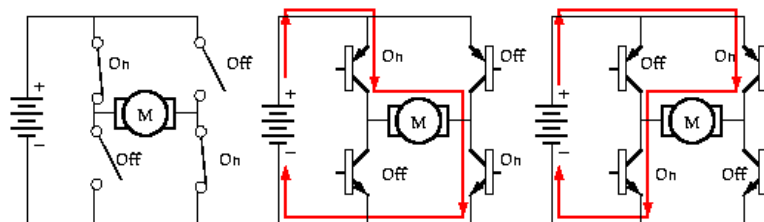
Pro takto vysoké proudy se skvěle hodí IGBT tranzistory. Jejich cena ovšem není moc příznivá. Po tom co jsem si prošel nabídky výkonových tranzistorů od českých prodejců, zjistil jsem znepokojivé údaje v popisech tranzistorů, kde například prodejci uváděli kontinuální kolektorový proud 60A u tranzistoru s průřezem vývodu cca 1mm. Při reálném průtoku takového proudu by tranzistor téměř okamžitě shořel, toto tvrzení mi prodejce přímo na prodejně vyvracel a vnucoval mi tranzistor pro kontinuální proud 60A v pouzdře TO220, což je hloupost.

Rozhodl jsem se použít průmyslově řešené tranzistory IGBT pro velké proudy, kdy jsou ve velkém pouzdře vybaveném chladičem přes celou spodní stranu umístěny dva a více tranzistorů. Jsou ovšem velice drahé a jejich cena je v řádech tisíců korun za kus. Opět mi pomohl můj bezedný šuplík ze kterého jsem vytáhl čtyři dvojitě IGBT moduly FUJI 2MBI-300P použitelné pro proud až 300A. Každý modul obsahuje 2 IGBT tranzistory. Proud 300A je o hodně víc než je třeba, ale vzhledem k mému omezenému studentskému rozpočtu je cena rozhodující.



Obr. 24 IGBT modul FUJI 2MBI-300P je poměrně veliký – srovnání s cívkou cínu

Pro řízení rychlosti otáček vystačíme pouze s jedním tranzistorem na motor. Pokud ovšem chceme použít i reverzaci je třeba použít takzvaný H most. H most je tvořen čtyřmi tranzistory, mezi kterými je umístěna zátěž a spínáním vždy dvou do kříže umístěných tranzistorů měníme směr stejnosměrného proudu protékajícího zátěží.



Obr. 25 Princip činnosti H mostu [3]

4.9 Budiče IGBT

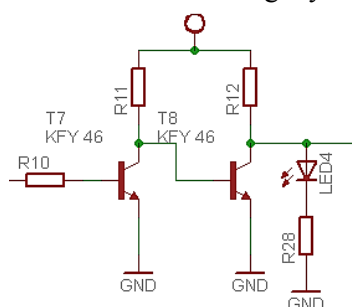
Pro řízení dvou motorů je tedy třeba osmi výkonových tranzistorů. IGBT tranzistory se otevírají napětím (polem), proud do nich tekoucí je velmi malý. Protože FUJI 2MBI-300P potřebují k otevření větší napětí, než je 3,3V z mikropočítače je třeba tento výstup zesílit. K tomu jsem navrhl obvod budičů IGBT.

Je bezpodmínečně nutné, aby se nikdy neotevřely tranzistory H mostu tak, aby skrze ně protékal proud zdroje. Toto řeší řídicí logika mikropočítače PIC18F26J50. Ovšem i když je logika odpojena je silový obvod stále připojen k baterii. Je tedy nutné ošetřit řídicí elektrody tranzistorů tak, aby byly vždy uzemněny a tranzistory tak otevíral až budící obvod. Toto je nutné udělat, protože IGBT tranzistor se dokáže otevřít i pomocí statického napětí na řídicí elektrodu a toto může mít při proudech jaké je baterie ve zkratu schopná vydat fatální následky.

Napětí lze zesílit tak, že použijeme zapojení tranzistoru se společným emitorem. Problém tohoto zapojení však je, že obrací fázi. Tento jev jsem se rozhodl vyřešit přidáním druhého tranzistoru jako negace prvního, čímž se fáze vrátí do normálu.

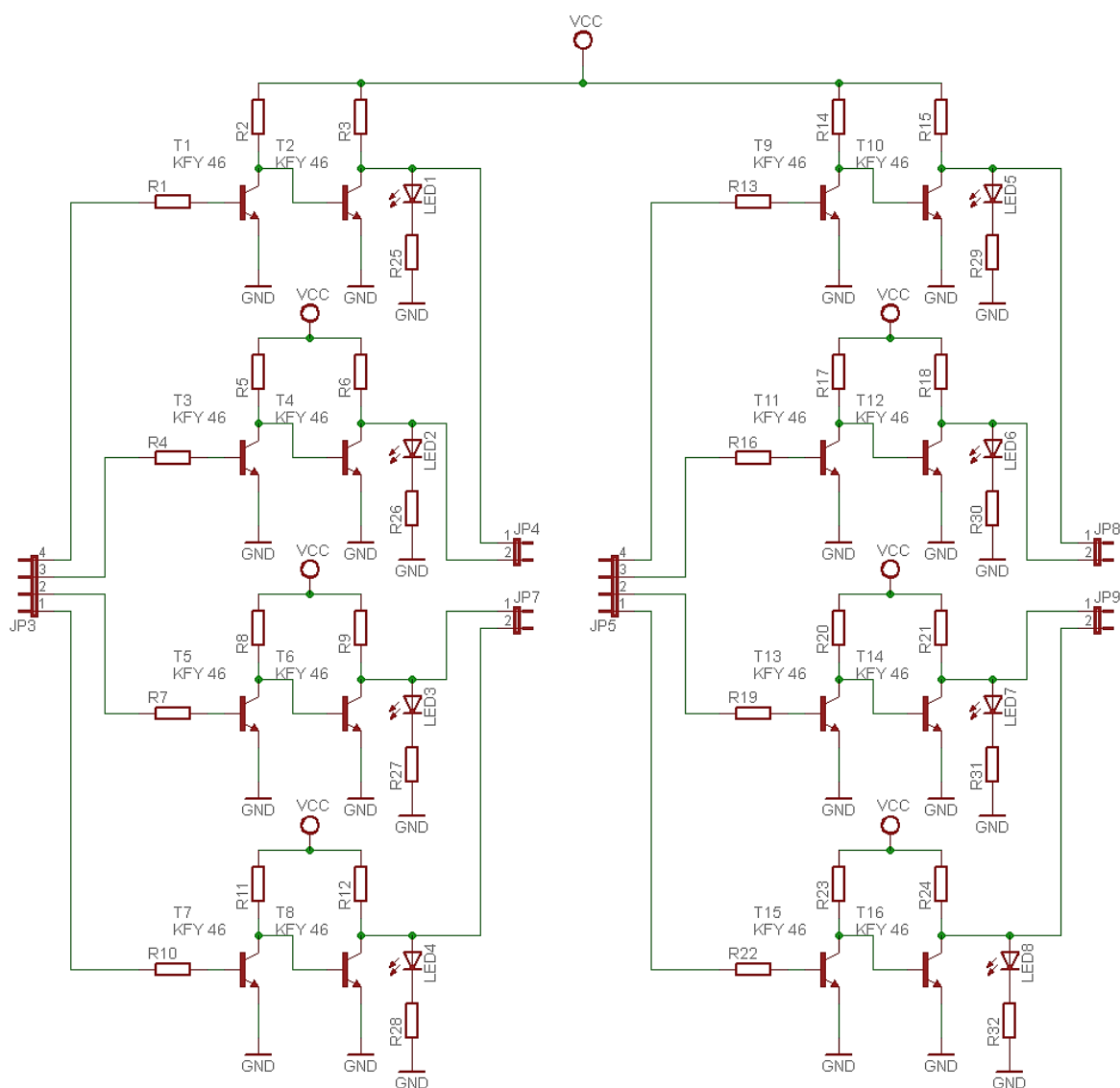
Pokud je tedy na vstupu logická nula je za prvním tranzistorem logická jednička (ovšem již napětově zesílená) a na výstupu druhého tranzistoru je opět logická 0. Pokud je na vstupu logická 1 je na výstupu druhého tranzistoru také logická 1 ovšem již na požadované napětě úrovni. Pokud je vstup odpojen otevře se druhý tranzistor proudem tekoucím skrze emitorový rezistor prvního tranzistoru, protože zapojení se společným emitorem otáčí fázi je na výstupu logická 0 a IGBT tranzistor je uzavřen.

Pro indikaci zda funguje buzení korektně jsem použil LED diodu. Neuvědomil jsem si ovšem fakt, že při vysoké frekvenci spínání teče jistý malý proud i do řídicí elektrody IGBT tranzistoru. Použití diody tento proud stahovalo a proto jsem musel LED diody nakonec odstranit. I to však nestačilo a musel jsem snížit hodnotu kolektorového rezistoru druhého tranzistoru, čímž se začal tranzistor mírně zahřívat, to vše však v rámci katalogových hodnot.



Obr. 26 Schema zapojení budiče IGBT

Namísto dvou tranzistorů by bylo vhodnější použít optočleny. Tyto by se otevíraly proudem z výstupu mikropočítače a na jejich výstup by šly připojit přímo IGBT tranzistory. Kdyby bylo zařízení určeno k sériové výrobě určitě bych použil optočleny. Já ovšem navrhuji jen prototyp, tak jsem použil to nejlevnější co jsem měl doma v zásobě a to byly tranzistory Tesla KFY 46.



Obr. 27 Schema zapojení obvodů pro buzení IGBT

Seznam součástek obvodů pro buzení IGBT:

<i>R1, R2, R4, R5, R6, R7, R8, R10, R11, R12, R13, R14, R16, R17, R18, R19, R20, R22, R23, R24</i>	<i>1k0 / 0,7W</i>
<i>R3, R9, R15, R21</i>	<i>5k6 / 0,7W</i>
<i>R25-R32</i>	<i>18k / 0,5W</i>
<i>LED1-LED6</i>	<i>L-53LSRD</i>
<i>JP4, JP7-JP9</i>	<i>konektor se zámkem XINYA PSH02-02PG, 2-pinový</i>
<i>JP3, JP5</i>	<i>konektor se zámkem XINYA PSH02-04PG, 4-pinový</i>
<i>T1-T16</i>	<i>Tesla KFY 45</i>

Zvyšující měnič

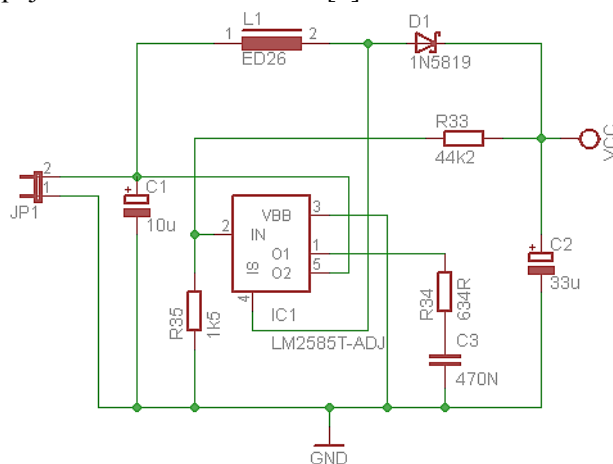
Protože mnou použité IGBT tranzistory jsou všechny typu NPN je k plnému otevření H mostu třeba vyšší napětí, než je napětí zdroje. Tohoto zvýšení napětí lze dosáhnout buďto nábojovou pumpou, nebo použitím zvyšujícího měniče.

Výstupy mikropočítače jsou připojeny na konektor JP3 a JP5. Napěťově zesílený výstup budiče je vyveden na konektory JP4, JP7, JP8 a JP9. Vcc na schematu Obr. 27 je 36V ze zvyšujícího měniče, který popíšu dále.

Rozhodl jsem se pro zvyšující měnič na 36V o výstupním proudu 1A. Toto rozhodnutí se později, po zjištění, že přes řídicí elektrodu při vyšší frekvenci teče jistý proud, ukázalo jako lepší, protože nábojová pumpa by nemusela být tak tvrdým zdrojem proudu.

Zvyšující měnič je postaven na obvodu LM2585T-ADJ firmy Texas Instruments, která mi jej zaslala zdarma jako vzorek pro tvorbu prototypů. Tímto bych chtěl firmě Texas Instruments poděkovat za poskytnutí vzorku a za jeho velmi rychlé dodání (z USA do České Republiky za zhruba tři pracovní dny). Obvod zvyšujícího měniče je na desce plošných spojů spolu s obvodem pro buzení IGBT tranzistorů.

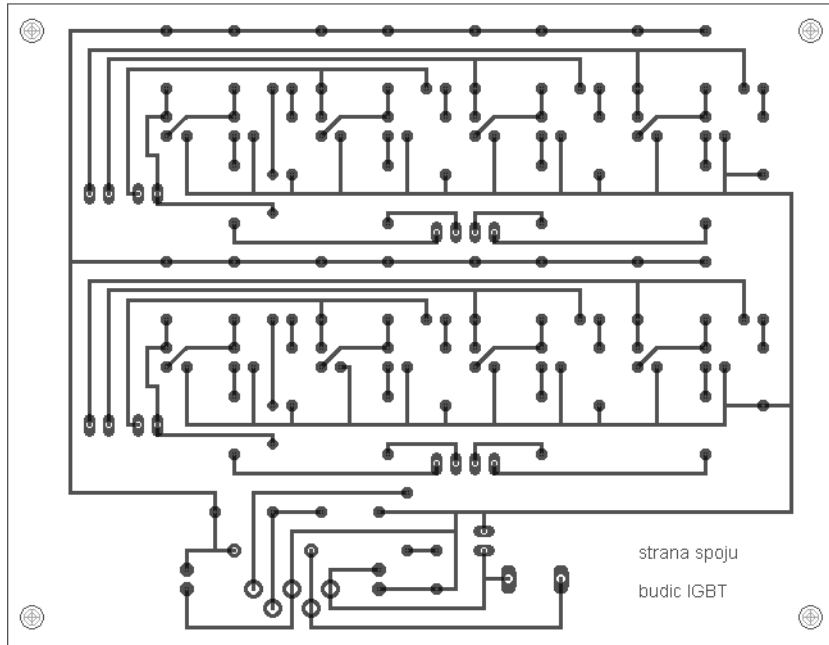
Schema zapojení je navrženo online generátorem WEBENCH designer firmy Texas Instruments dostupným na www.ti.com. Do generátoru stačí zadat rozsah vstupních napětí, požadované výstupní napětí a výstupní proud. Zbytek vypočítá automaticky a na výstupu dostaneme schéma zapojení a seznam součástek. [5]



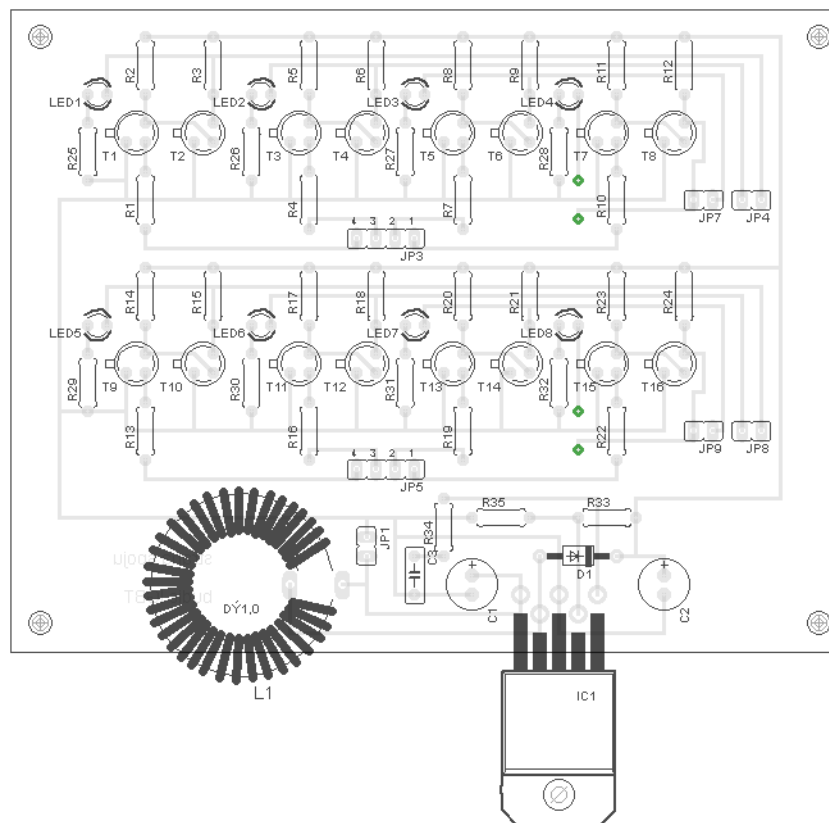
Obr. 28 Schema zapojení obvodu zvyšujícího měniče pro plné otevření IGBT

Seznam součástek obvodů pro buzení IGBT:

R35	1k5 / 0,7W	C2	33uF / 63V
R34	634R / 0,7W	C3	470nF / 63V
R33	44k2 / 0,7W	JP1	konektor se zámkem PSH02-02PG, 2-pinový
D1	1N5819	IC1	LM2585T-ADJ
C1	10uF / 63V		



Obr. 29 Deska plošných spojů budiče IGBT – strana spoju



Obr. 30 Deska plošných spojů budiče IGBT – rozmístění součástek

5 Návrh programového řešení

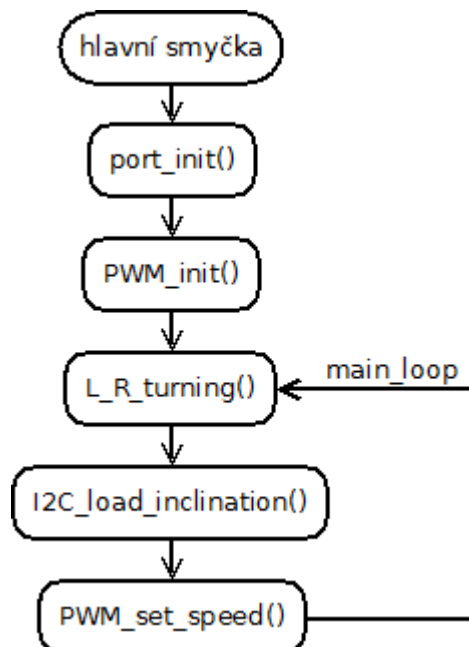
Celý program je psán v jazyce C. Použil jsem vývojový software (IDE) od firmy Mikroelektronika nazvaný mikroC. Software je určen pro jednoduché programování mikropočítačů PIC firmy Microchip. Programuje se v programovacím jazyce C a k dispozici je mnoho knihoven. Použil jsem knihovny pro komunikaci po I2C sběrnici, knihovnu pro pulzně šířkovou modulaci a knihovnu pro řízení A/D převodníku. [6]

Kompilátor mikroC je velmi rychlý a IDE obsahuje také tzv. code asistent, což je nástroj, který radí jaké metody lze použít v rámci té, či oné použité knihovny. Další výhodou je konfigurační průvodce (wizzard), kterým lze jednoduše nakonfigurovat mikropočítač.

5.1 Popis hlavní části programu

V hlavní části programu se nejdříve provede inicializace vstupních a výstupních portů. Poté se nakonfigurují moduly pulzně šířkové modulace. Pomocí A/D převodníku se načte analogová hodnota obsahující údaj o natočení řídítek a poté se pomocí I2C sběrnice naváže spojení s náklonoměrem MPU 6050. Náklonoměr sám vypočítá náklon na základě údajů z gyroskopu a akcelerometru a vrátí hodnotu náklonu, popřípadě Eulerův úhel.

Dále v hlavní smyčce jen načítám data o náklonu a podle toho zda se náklon zvyšuje či snižuje přidávám, nebo ubírám otáčky motorů. Před každým načtením úhlu náklonu je vyhodnocena poloha řídítek a podle ní jsou upraveny vzájemné otáčky obou motorů.



Obr. 31 Diagram hlavní smyčky programu

5.2 Inicializace vstupních a výstupních portů

Mikro počítač PIC18F26J50 nemá výstupy některých modulů pevně vyvedeny na vstupně výstupní porty, ale dá se nastavit, který výstup modulu bude na kterém pinu mikro počítače. Toto se nazývá Peripheral Pin Select (PPS). [7]

Bude třeba desíti výstupních portů. Po čtyřech pro každé PWM a dva pro signalizační diody. Piny se nastaví jako výstupní nastavením TRIS registru příslušného bitu portu na 0.

Mapování výstupu PWM modulů na výstupní piny mikro počítače se nastaví tak, že nastavíme PORx (x je číslo mapovatelného pinu) registru číslo odpovídající potřebnému výstupu PWM modulu dle tabulky na obrázku 32, tedy 14-21.

Function	Output Function Number ⁽¹⁾	Output Name
NULL	0	NULL ⁽²⁾
C1OUT	1	Comparator 1 Output
C2OUT	2	Comparator 2 Output
TX2/CK2	5	EUSART2 Asynchronous Transmit/Asynchronous Clock Output
DT2	6	EUSART2 Synchronous Transmit
SDO2	9	SPI2 Data Output
SCK2	10	SPI2 Clock Output
SSDMA	12	SPI DMA Slave Select
ULPOUT	13	Ultra Low-Power Wake-up Event
CCP1/P1A	14	ECCP1 Compare or PWM Output Channel A
P1B	15	ECCP1 Enhanced PWM Output, Channel B
P1C	16	ECCP1 Enhanced PWM Output, Channel C
P1D	17	ECCP1 Enhanced PWM Output, Channel D
CCP2/P2A	18	ECCP2 Compare or PWM Output
P2B	19	ECCP2 Enhanced PWM Output, Channel B
P2C	20	ECCP2 Enhanced PWM Output, Channel C
P2D	21	ECCP2 Enhanced PWM Output, Channel D

Obr. 32 Tabulka pro peripheral pin select [7]

Při použití MikroC jsem použil hotovou knihovnu pro mapování a tři její metody. Pomocí metody Unlock_IOLOCK() zpřístupním mapování, poté provedu PPS mapování a nakonec pomocí LockIOLOCK() zamknu.

Samotné mapování se provádí voláním metody pps mapping

```
PPS_Mapping(char rp_num, char input_output, char funct_name);
```

Rp_num je číslo mapovatelného pinu. Tyto piny jsou očíslovány od RP0 až po RP17, viz. Obr. 19. Na pozici char input_output se napíše „_INPUT“, nebo „_OUTPUT“ v závislosti na tom, zda má být mapovaná pin použit jako vstup, či výstup. Funct_name je pojmenování výstupu z obr. 32 podle konvencí výrobce knihovny. [9]

Ukázka namapování kanálu A PWM modulu 1 na RP0 (jako výstup):

```
PPS_Mapping(0, _INPUT, _CCP1_P1A);
```

5.3 Nastavení modulu pulzně šířkové modulace (PWM)

Mikro počítač PIC18F26J50 má dva PWM moduly, každý použijí pro řízení otáček jednoho motoru. PWM moduly je možno nastavit pro řízení jednoho výstupu (jas LED, otáčky motoru v jednom směru), dvou výstupů (polomost), nebo pro řízení celého H-mostu (full bridge control). V režimu řízení full bridge je hardwarem ošetřeno otevření tranzistorů „proti sobě“, což by způsobilo zkrat a zničení tranzistoru, nebo baterie.

Pro nastavení PWM modulu do režimu full bridge je třeba nastavit CPPxCON registr (x=1 pro PWM1 modul, x=2 pro PWM2 modul).

R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0
PxM1	PxM0	DCxB1	DCxB0	CCPxM3	CCPxM2	CCPxM1	CCPxM0
bit 7							bit 0

Obr. 33 Bity CPPxCON registru [7]

Nastavením bitů PxM1 a PxM0 lze ve full bridge módu měnit směr otáčení motoru, 01b dopředný režim, 11b reverzace.

Pomocí bitů CCPxM0-CCPxM3 lze ve full bridge módu nastavit zda jednotlivé výstupy budou aktivní v logické 1, nebo v logické 0. Použil jsem nastavení pro všechny bity aktivní v logické 1, dle datasheetu CCPxM3-CCPxM0 = 1100b.

V DCxB1 a DCxB0 jsou uloženy spodní dva bity desetibitové hodnoty reprezentující PWM duty cycle (tedy délku pulzu pulzně šířkové modulace). Osm zbývajících bitů se nachází v registru CCPRxL. Při 10-bitovém rozlišení je tedy 1024 úrovní PWM, při započtení reverzace se toto číslo zdvojnásobí na 2048.

Pro časování PWM se používá modul časovače 2, nebo časovače 4 (timer2, nebo timer4).

Pro výpočet periody pulzů (perioda $T = 1/f$, f – frekvence) se používá následující vzorec:

$$PWM\ Period = [(PR2) + 1] \cdot 4 \cdot TOSC \cdot (TMR2\ Prescale\ Value)$$

PR2 je Period registr timeru2, když je hodnota timeru rovná hodnotě v PR2 vyvolá se přerušování. TOSC je perioda oscilátoru (převrácené hodnoty frekvence). TMR2 Prescaler Value je hodnota předděliče nastavená timeru 2. Lze nastavit předdělič na 1:1 / 1:4 / 1:16.

Délka periody se určí dle tohoto vzorce:

$$PWM\ Duty\ Cycle = (CCPRxL : CCPxCON\ 5 : 4) \cdot TOSC \cdot (TMR2\ Prescale\ Value)$$

CCPRxL a CCPxCON(bit 5 a 4) obsahují výše zmiňovanou 10-bitovou hodnotu délky pulzu PWM.

Nastavení PWM modulace v pěti krocích:

1. Nastavení periody zapsáním do PR2 registru.
2. Nastavení délky pulzu PWM pomocí zápisu 10-ti bitové hodnoty do CCPxL registru a CCPxCON<5:4>.
3. Nastavení příslušného CCPx pinu jako výstupního (viz. 5.2).
4. Nastavení předděliče časovače a jeho nastartování pomocí zápisu do TxCON.
5. Nastavení modulu PWM do potřebného módu.

Nastavení PWM v mikroC:

V mikroC je knihovna pro nastavení PWM, která dělá nastavení velmi jednoduchým.

Stačí podle kapitoly 5.2 namapovat PWM moduly na výstupní piny a poté použít tři jednoduché metody:

- Pwm1_Init(500); - nastaví PWM modulaci na frekvenci 500Hz, používá se jen jednou při inicializace.
- Pwm1_start(); - zapne PWM modul.
- Pwm1_stop(); - vypne PWM modul.
- Pwm1_Change_Duty(30); - nastaví délku pulzu PWM na 30%.

5.4 I2C komunikace s modulem MPU 6050

Pro I2C komunikaci jsem použil knihovnu dodanou k mikroC s názvem I2C library. Pomocí knihovny lze velmi jednoduše komunikovat po I2C sběrnici.

Ukázka kódu pro zápis na I2C:

```
void mpu_write(unsigned char address, unsigned char d) //address -  
adresa v paměti MPU6050, d - data  
která se zapíše na pozici address  
{  
    I2C1_Start(); //start I2C  
    I2C1_Wr(0xD0); //adresa 0xD0-write-I2C adresa MPU6050 pro zápis  
    I2C1_Wr(address); //nastavím adresu paměti MPU6050 na kterou se  
bude zapisovat  
    I2C1_Wr(d); //zápis dat  
    I2C1_Stop(); //stop I2C komunikace  
}
```

Ukázka kódu pro čtení z I2C:

```
unsigned char mpu_read(unsigned char address)    //address - adresa
                                                v paměti MPU6050 ze které se bude číst char d
{
    unsigned char d;                          //návratová hodnota
    d=0;
    I2C1_Start();                             //start I2C komunikace
    I2C1_Wr(0xD0);                             //adresa 0xD0 - write - I2C adresa MPU6050
    I2C1_Wr((unsigned char)address);          //zapišu adresu ze které se
                                                bude číst
    I2C1_Repeated_Start();                     //opakovaný start - budou se
                                                číst data
    I2C1_Wr(0xD1);                             //adresa 0xD1 - read - I2C adresa MPU6050
    d = I2C1_Rd(0);                             //vyčtení dat z paměti MPU6050
    I2C1_Stop();                               //konec I2C komunikace
    return(d);                                 //návrat vyčtených hodnot
}
```

Nastavení komunikace pomocí MikroC se ukázalo jako velmi jednoduché, ale problém nastal v datasheetech popisujících chování MPU 6050. Vykazovaly totiž chyby. Po přečtení asi desíti fór kde se lidé pokoušeli neúspěšně spojit s MPU 6050 jsem stále nemohl najít důvod proč se to nedaří ani mně, ani lidem na fórech. Po několika dnech kdy už jsem zkusil téměř vše včetně osciloskopu napíchnutého na I2C sběrnici jsem narazil na drobný kus kódu na kterém někdo řešil problémy s MPU 6050. Co mě na tomto kódu zarazilo byla jiná I2C adresa zařízení MPU 6050 než je v datasheetu i než kterou používala většina lidí na fórech, která jsem navštívil. Rozhodl jsem se tuto adresu vyzkoušet a ukázala se jako správná a s MPU 6050 jsem navázal spojení. Je k neuvěření, že na tuto chybu nikdo na fórech které jsem procházel nepoukázal. Je možné, že mám jinou revizi MPU 6050, kterou výrobce opomenul zahrnout do datasheetu.[12]

Nastavení MPU 6050 (podle datasheetu [12]):

```
I2C1_Init(400000);                          // inicializace I2C pro 100 kHz komunikaci
mpu_write(0x6B, 0x80);                       //PWR_MGMT_1 -- DEVICE_RESET 1)
Delay_ms(5);                                  //čekání 5ms
mpu_write(0x6B, 0x03);                       //PWR_MGMT_1 -- SLEEP 0;CYCLE 0;TEMP_DIS 0;
                                                CLKSEL 3 (PLL with Z Gyro reference)
mpu_write(0x1A, 0);                           //CONFIG -- EXT_SYNC_SET 0 (disable input
                                                pin for data sync) ; default DLPF_CFG = 0
                                                =>ACC bandwidth=260Hz GYRO bandwidth=256Hz)
mpu_write(0x1B, 0x18);                       //GYRO_CONFIG -- FS_SEL = 3: Full scale set
                                                to 2000 deg/sec
mpu_write(0x1C, 0x18);                       //ACCELERO_CONFIG
```

Tento kód nastaví MPU6050. Nejprve se provede reset zařízení a poté se počká 5ms na náběh MPU6050. Dále se dle instrukcí výrobce nastaví power management tak, aby se MPU6050 neuváděl do režimu sleep a aby necykloval, dále se mu nastaví zdroj hodinového signálu. V dalším bodě se nastaví šířka pásma pro akcelerometr a gyroskop. Nakonec se provádí inicializace gyroskopu a akcelerometru.

Problém s DMP u MPU 6050

Surová data z gyroskopu a akcelerometru jsou velmi zarušená a je nad nimi potřeba provést jisté korekční výpočty. Tyto výpočty jsou velmi složité a náročné na výkon mikropočítače. Pro provádění takovýchto výpočtů je MPU 6050 vybaven integrovanou jednotkou Digital Motion Processing unit, která dovede vypočítat takzvanou šestiosou fůzi, při které jsou data z gyroskopu použita jako korekce pro data z akcelerometru. Data by také podle datasheetu měla být zároveň zbavena šumů.

Problém nastal když jsem chtěl DMP procesor použít. Nikde na webu výrobce jsem nenašel návod jak se DMP používá. Po pročetí mnoha fór jsem zjistil, že DMP sice všechny funkce, které jsou popsány v datasheetech (šestiosá fůze, filtrování šumů ...) umí vypočítat, ale je ho třeba naprogramovat přes I2C.

S tímto problémem jsem sice nepočítal, ale bylo by to stále řešitelné. Začal jsem tedy na internetu hledat jak se DMP programuje a nastal fatální problém. Výrobce všude na svém webu popisuje MPU 6050 jako absolutně skvělou věc, hlavně proto, že obsahuje DMP jednotku a také si podle toho nechá zaplatit oproti konkurenci značný finanční obnos navíc. U Farnelu jsem za DMP 6050 evaluation board zaplatil necelé 3000 Kč. Problém je, že instrukce pro použití DMP jednotky jsou poskytovány pouze velkým korporacím a já jako student mám tedy smůlu. S tímto jsem při nákupu opravdu nepočítal. Napsal jsem proto dodavateli MPU 6050 evaluation board žádost o dodání potřebných datasheetů. Mé žádosti ovšem nebylo vyhověno a s celým projektem jsem se ocitl ve slepé uličce, protože mnou použitý mikropočítač nemá výkon na to aby provedl výpočty potřebné pro odfiltrování šumů z gyroskopu a akcelerometru.

5.5 Návrhy možných korekčních algoritmů

Pro výpočet korekcí lze použít Kalmanův filtr, jeho implementace je velmi složitá. Jeho výstup je však hodně přesný a je schopen predikce následných stavů. Další značnou nevýhodou je velmi vysoká výpočetní náročnost Kalmanova filtru. Jako jiná jednodušší alternativa by šel použít komplementární filtr, který je méně účinný a na procesorový čas méně náročný. Jeho základem je použití dvou filtrů a numerické integrace. [14]

6 Závěr

Návrh dvoukolového podvozku pro přepravu osob mi přinesl mnoho poznatků týkajících se návrhu mechanické, elektrické i programové stránky zařízení. Seznámil jsem se podrobně s problematikou řízení otáček motorů pomocí PWM modulace. Naučil jsem se budít výkonové IGBT tranzistory a využívat měniče napětí s vysokou účinností. Velkým přínosem mi bylo proniknutí do problematiky snímačů náklonu a to hlavně gyroskopů a akcelerometrů s nimiž jsem se naučil komunikovat po sběrnici I2C. Dále jsem se naučil programovat mikropočítače PIC ve vyšším programovacím jazyce mikroC – dříve jsem mikropočítače PIC programoval pouze v assembleru.

V průběhu psaní této práce jsem zjistil, že se o něco podobného před časem pokusili na VUT v Brně a na americké MIT. Na obou těchto školách na projektu vozítka pracovaly mnohočlenné pracovní týmy a byly financovány školou.

Celý návrh zařízení jsem založil na faktu, že využiji DMP jednotky MPU 6050. Ve finální fázi projektu jsem zjistil, že výrobce k jednotce MPU 6050 nedodává potřebný datasheet pro obsluhu DMP. Po komunikaci s dodavatelem jsem se dozvěděl, že tento popis je dodáván pouze velkým firmám a korporacím a já, jako student, tedy nemohu výhod DMP využít. I když se mi nepodařilo projekt díky jednotce MPU 6050 dotáhnout do úplného konce věřím, že časem výrobce zpřístupní popis k práci s DMP jednotkou a že se zařízení podaří úspěšně rozpohybovat. Popřípadě použiji jiný výkonnější mikropočítač a potřebné korekce a filtrace provedu namísto DMP jednotky sám.

V době odevzdání práce je zařízení schopné komunikovat s náklonoměrem MPU 6050 a umí řídit otáčky obou motorů. V průběhu vývoje vozítka mne oslovilo několik lidí s návrhem, že bych mohl toto vozítko vyrábět a prodávat. Rozhodl jsem se ověřit, zda je to patentově možné, protože prodejní cena mého výrobku by byla až pětina oproti prodejní ceně amerického vozítka Segway. Problém je ovšem v patentech, Segway má své vozítko tak dobře patentově ošetřené, že kdybych se ho já, nebo kdokoli jiný rozhodl v Evropě vyrábět a prodávat, žalobě by se nevyhnul.

7 Seznam použité literatury

- [1] Stejnospměrné Motory. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2013, 8.3.2013 [cit. 27.3.2013]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektromotor#Stejnospm.C4.9Brn.C3.BD_stroj
- [2] SEGWAY INC. [online]. 2013 [cit. 2013-03-27]. Dostupné z: www.segway.com
- [3] LEINWEBER, Glen. Reversing Motor Direction: the "H-Bridge". [online]. [cit. 21.4.2013]. Dostupné z: http://epic.mcmaster.ca/~glen/4a4/h_bridge.html
- [4] Popis funkce vozítka SEGWAY. SEGWAY LLC. [online]. [cit. 2013-04-25]. Dostupné z: http://www.segway.cz/segway/component_details.html
- [5] TEXAS INSTRUMENTS INCORPORATED. [online]. [cit. 2013-04-25]. Dostupné z: www.ti.com
- [6] MIKROELEKTRONIKA. *MikroC compiler* [online]. 1998-2013. [cit. 2013-04-26]. Dostupné z: <http://www.mikroe.com/mikroc/pic/>
- [7] MICROCHIP. *PIC18F46J50: Data Sheet* [online]. U.S.A., 2011 [cit. 2013-04-28]. ISBN 978-1-61341-027-1. Dostupné z: [ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc / 39931d.pdf](http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39931d.pdf)
- [8] Motory. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2013, 8.3.2013 [cit. 27.3.2013]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektromotor>
- [9] Microchip PIC MicroC libraries. MIKROELEKTRONIKA. [online]. 2002-2012. [cit. 2013-04-28]. Dostupné z: <http://www.mikroe.com/mikroc/pic/libraries/>
- [10] IVENSENSE. [online]. 2013. vyd. [cit. 2013-04-29]. Dostupné z: <http://www.invensense.com/>
- [11] MPU-6000/MPU-6050: 9-Axis Evaluation Board. IVENSENSE. [online]. 1.12.2011. [cit. 2013-04-29]. Dostupné z: <http://invensense.com/mems/gyro/documents/AN-MPU-6000EVB.pdf>
- [12] MPU-6000/MPU-6050: Register Map and Descriptions. IVENSENSE. [online]. 3.9.2012. [cit. 2013-04-29]. Dostupné z: <http://invensense.com/mems/gyro/documents/RM-MPU-6000A.pdf>
- [13] PICO: self-balancing robot. [online]. 27.6.2010 [cit. 2013-04-29]. Dostupné z: <http://letsmakerobots.com/node/21456>
- [14] The Balance Filter: A Simple Solution for Integrating Accelerometer and. MIT. [online]. 25.6.2007 [cit. 2013-04-29]. Dostupné z: <http://web.mit.edu/scolton/www/filter.pdf>

- [15] Wheel scary: Chinese anti-terror police practise killing drills on scooters [online]. 2008 [cit. 2013-05-02]. Dostupné z: <http://www.dailymail.co.uk/news/article-1031298/Wheel-scary-Chinese-anti-terror-police-practise-killing-drills-scooters.html>
- [16] Součástky řízené neelektrickými veličinami [online]. 2007 [cit. 2013-05-02]. Dostupné z: <http://www.spsemoh.cz/vyuka/zel/neelektricke.htm>
- [17] Chipworks [online]. 2013 [cit. 2013-05-02]. Dostupné z: chipworks.com

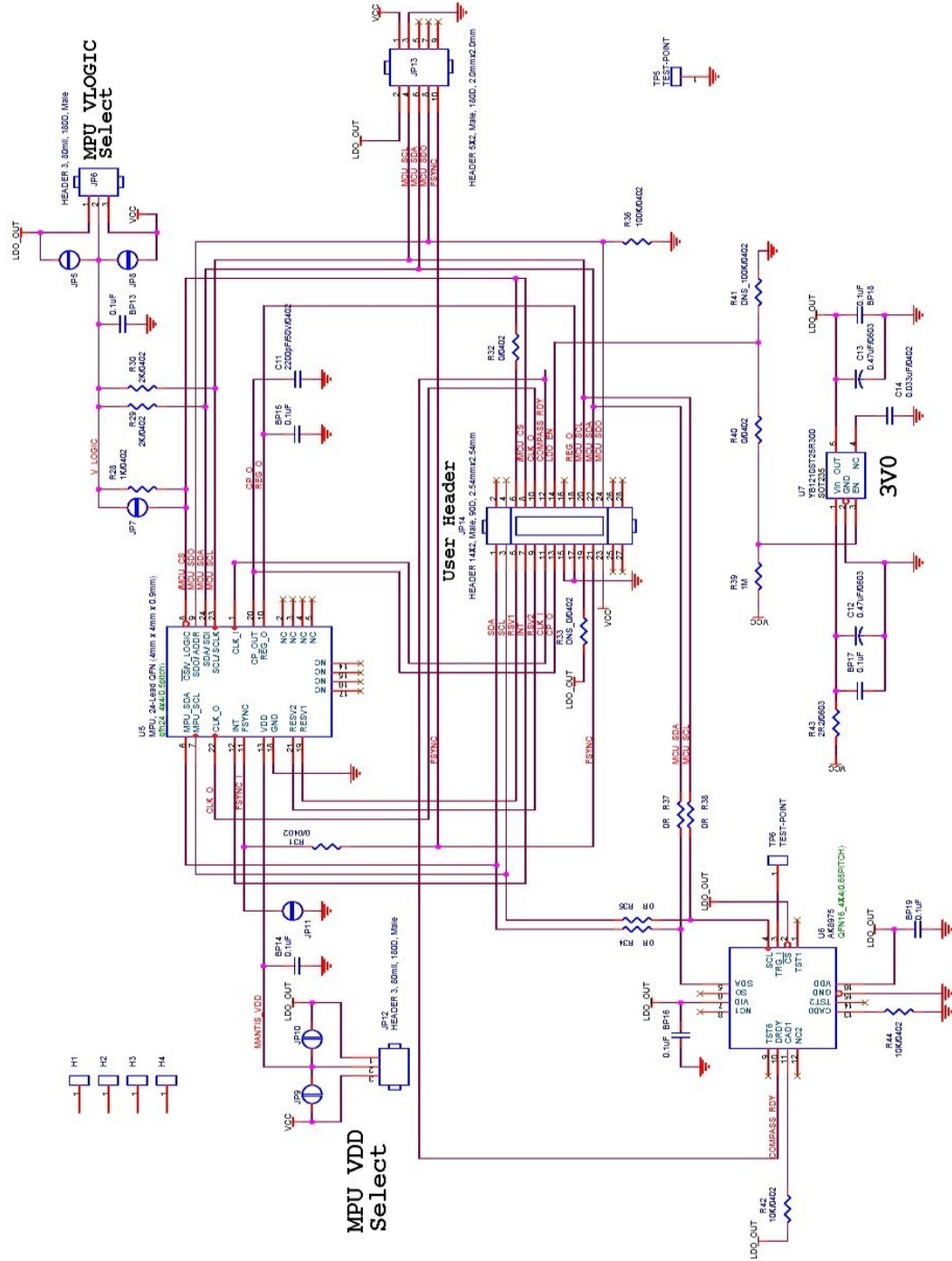
8 Přílohy

Seznam příloh

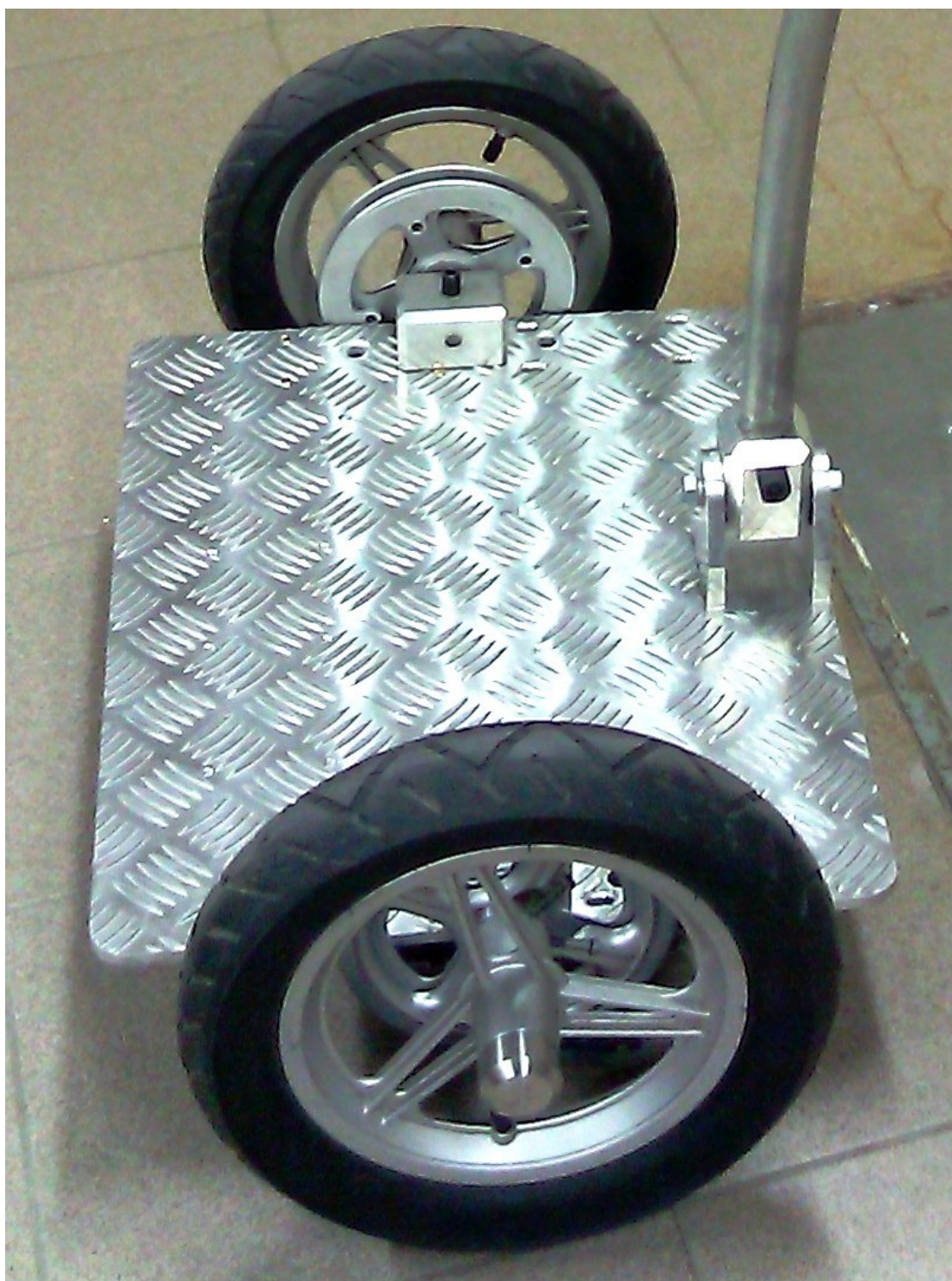
8.Přílohy	46
[A] Schémata	47
[A.1] MPU6050 evaluation board [11].....	47
[B] Fotografie hotového vozítka.....	48

[A] Schémata

[A.1] MPU6050 evaluation board [11]



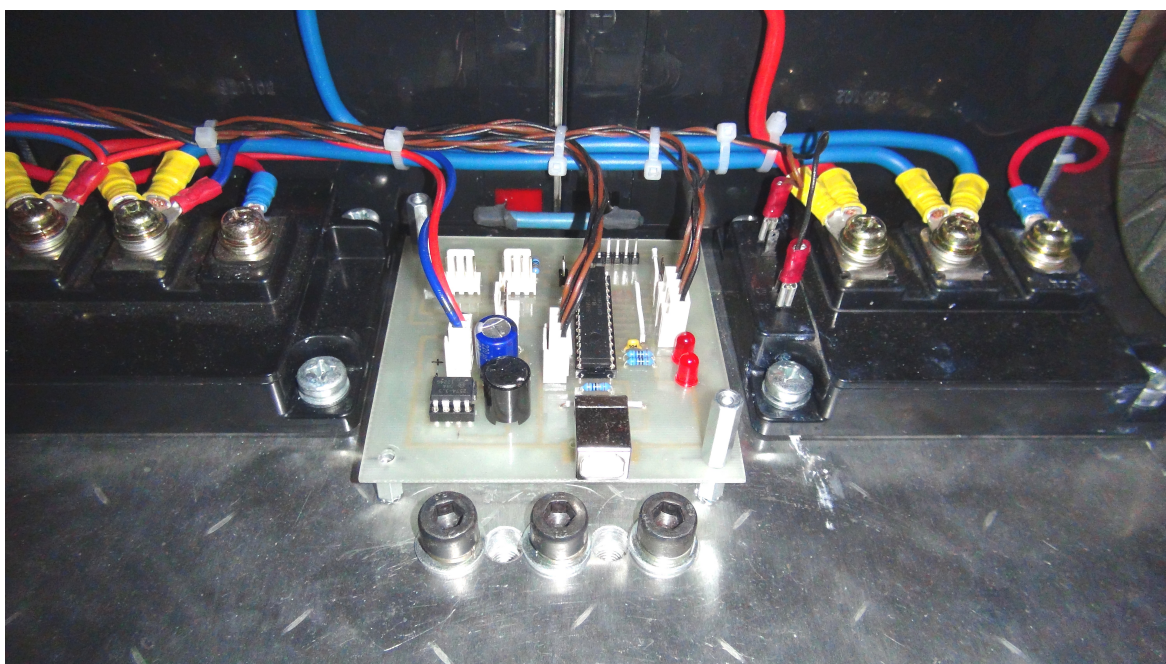
[B] Fotografie hotového vozítka



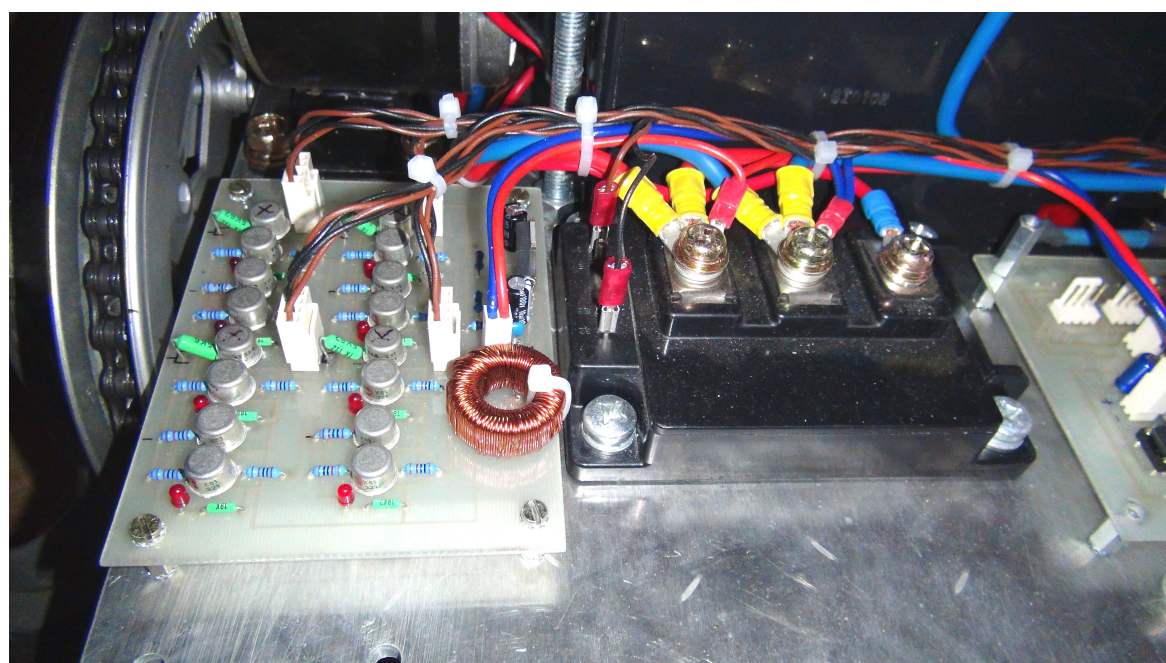
Obr. 34 Vozítka ve vyváženém stavu



Obr. 35 Osazená plošina



Obr. 36 Nainstalovaná deska řídicí logiky



Obr. 37 Nainstalovaná deska budičů IGBT