



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

PROSTOROVÝ OVLADAČ

3D CONTROLLER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Lukáš Hrubý

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Marek Bohrn, Ph.D.

BRNO 2016



Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Mikroelektronika a technologie**
Ústav mikroelektroniky

Student: Lukáš Hrubý

ID: 164291

Ročník: 3

Akademický rok: 2015/16

NÁZEV TÉMATU:

Prostorový ovladač

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Provedte návrh a realizaci systému bezdrátového prostorového ovladače.

Ke snímání polohy budou sloužit akcelerometry, gyroskopy a magnetometry. Přenos dat do cílového zařízení bude řešen bezdrátově pomocí rozhraní WiFi nebo Bluetooth. Zvažte možnost bezdrátového nabíjení zařízení.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 8.2.2016

Termín odevzdání: 2.6.2016

Vedoucí práce: Ing. Marek Bohrn, Ph.D.

Konzultant bakalářské práce:

doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D., předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Předkládaná práce se zabývá problematikou snímání polohy zařízení v prostoru, zpracování dat o jeho poloze a odesílání těchto dat dále do koncového zařízení. V rámci této práce bude vytvořen prostorový ovladač, který bude na základě akcelerometru, gyroskopu a magnetometru snímat svoji aktuální polohu vůči Zemi a tuto polohu dále bezdrátově odesílat do ovládaného zařízení. Jednotlivé komponenty pro návrh budou vybrány na základě předchozích zkušeností a dostupné dokumentace.

KLÍČOVÁ SLOVA

Akcelerometr, magnetometr, gyroskop, Bluetooth, 3D, ovladač

ABSTRACT

The following work deals with problems of scanning of device position in space, processing of collected data about its position and sending these data to end device. In scope of this work will be created special controller which will use accelerometer, gyroscope and magnetometer to scan its actual position in respect to Earth and it will wirelessly send its position to controlled device. Individual components for proposal will be chosen based on previous experience and available documentation.

KEYWORDS

Accelerometer, magnetometer, gyroscope, Bluetooth, 3D, controller

HRUBÝ, L. *Prostorový ovladač*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav mikroelektroniky, 2016. 42 s., 12 s. příloh. Vedoucí bakalářské práce Ing. Marek Bohrn, Ph.D..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Prostorový ovladač jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Marku Bohrnovi, Ph.D. za odbornou pomoc při plnění jednotlivých úkolů a za vedení při zpracování bakalářské práce.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

OBSAH

Úvod	6
1 Rozbor problematiky	7
1.1 MEMS Akcelerometr	7
1.2 MEMS Gyroskop	8
1.3 MEMS Magnetometr	8
1.4 Bezdrátová komunikace	9
1.5 Napájení a nabíjení	9
2 Návrh zařízení	11
2.1 Výběr komponent	12
2.1.1 Senzor – akcelerometr, gyroskop, magnetometr	12
2.1.2 Obvod FPGA	13
2.1.3 Bluetooth modul	13
2.1.4 Nabíjecí obvod	14
2.1.5 Li-Pol baterie	14
2.1.6 Ostatní součástky	15
2.2 Elektromechanický návrh zařízení	16
2.2.1 Mechanický návrh	16
2.2.2 Elektrický návrh	20
2.3 Konstrukce ovladače	24
3 Firmware a software	27
3.1 Programování a párování Bluetooth modulů	27
3.2 Modul SPI komunikace – obvod FPGA	29
3.3 Modul UART komunikace – obvod FPGA	30
3.4 Vnitřní obvod FPGA popsáný ve VHDL jazyce	32
3.5 Vyhodnocení dat z prostorového ovladače	34
4 Závěr	37
Seznam použité literatury	38
Seznam symbolů, veličin a zkratk	39
Seznam obrázků	40
Seznam tabulek	41
Seznam příloh	42

ÚVOD

Cílem předkládané práce je konstrukčně a elektricky navrhnout prostorový ovladač na základě informací získaných v semestrální práci. Podobných zařízení je na trhu mnoho, ať už se jedná o samotné prostorové ovladače pro manipulaci s obrazem na PC v programech na úpravu 3D grafiky, ovládání některých elektronických zařízení a hraček nebo použití jejich senzorů (akcelerometrů a gyroskopů) v herních ovladačích a mobilních telefonech.

Jedno z prvních komerčně dostupných zařízení pro pohyb v prostoru vyvinula společnost The Forte Technologies pod názvem Cyberpuck. [1] Jedná se o první ovladač svého druhu, který dostal jméno podle tvaru hokejového puku. Cyberpuck nabízí uživatelům pohyb ve virtuální realitě nebo ve hrách pomocí náklonu vpřed, vzad, doprava a doleva maximálně 45° na každou stranu os. Ovladač byl ergonomicky navržen pro levou nebo pravou ruku a byl doplněn o tři programovatelná tlačítka, která měla za úkol plnit běžné funkce myši.

Navrhnutý 3D ovladač bude snímat pohyb ve všech směrech a jakémkoli úhlu. Prostorový ovladač by sám o sobě měl být lehce použitelný i pro uživatele, který s ním nemá žádné předchozí zkušenosti. Důraz bude tedy kladen na jednoduchost obsluhy a minimalizaci systémových funkcí pro nastavení snímání polohy. Snímání polohy zařízení se provádí pomocí akcelerometrických senzorů, gyroskopů a magnetometrů, kdy se pro určení přesné polohy používají data ze všech tří senzorů. Na základě přesnosti získaných informací budou vybrány senzory, které budou dodávat nejpřesnější data.

1 ROZBOR PROBLEMATIKY

3D ovladač je elektronické zařízení, které pomocí senzorů – akcelerometru, gyroskopu a magnetometru - snímá aktuální polohu vůči Zemi v ose X, Y a Z. Tato informace je ze senzorů posílána po sériové lince do výpočetní jednotky (v tomto případě obvodu FPGA), která data zpracuje a dále je odesílá přes vysílač do koncového ovládaného zařízení.

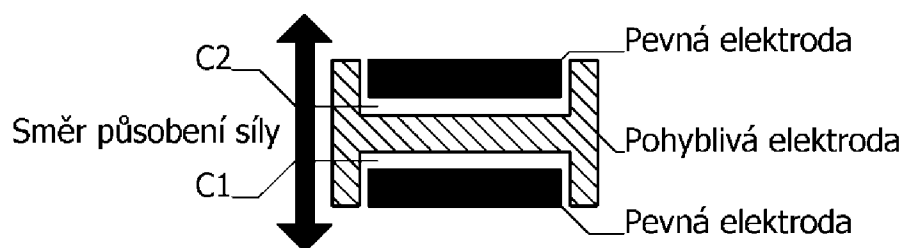
1.1 MEMS Akcelerometr

Akcelerometr je název pro senzor zrychlení, který nalézá využití ve všech moderních aplikacích s potřebou snímání pohybu. Firma Freescale v roce 2007 vytvořila zcela novou řadu 3D akcelerometrů založenou na technologii MEMS, které se vyznačují lepšími dynamickými vlastnostmi při menších rozměrech než původní komerční akcelerometry.

Struktura a funkce MEMS akcelerometrů je založena na proměnném tříelektrovém vzduchovém kondenzátoru. Technologie využívá závislosti kapacity C na vzdálenosti elektrod. Jestliže se prostřední elektroda kondenzátoru navrhne pohyblivá, přičemž její pohyb bude závislý na působení vnějšího zrychlení, vytvoříme kapacitní akcelerometr.

Technologie výroby akcelerometru na čip je založena na vytvoření pevné nosíkové struktury, mezi kterou se postupně protahují pohyblivé elektrody v kolmém směru na měřenou osu. Na křemíku se obvykle vytvoří několik takovýchto struktur pro získání většího výstupního signálu a menšího zkreslení.

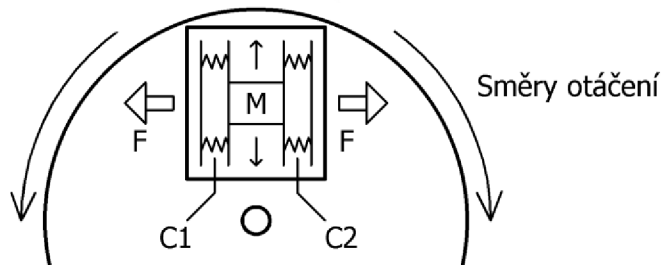
Tento typ výroby je určen pouze pro snímání v jednom směru. Pro 3D kapacitní akcelerometry je zapotřebí vytvořit tři struktury, kdy každá z nich měří v jedné ose. Osa X a Y není technologicky náročná, jelikož se vyrábí do plochy. Pro měření v ose Z je třeba vytvořit výškově pohyblivou strukturu. [2]



Obrázek 1-1: Zjednodušený princip kapacitního senzoru

1.2 MEMS Gyroskop

Gyroskop je zařízení určené pro měření úhlové rychlosti, tedy údaje o tom, jak rychle se daný objekt otáčí v jednotkách stupeň za sekundu (dps) v osách X, Y a Z. Integrované MEMS gyroskopy pracují na principu Coriolisovy síly. [3]



Obrázek 1-2: Princip MEMS gyroskopu

MEMS gyroskopy pracují na podobném principu jako MEMS akcelerometry, tedy obsahují pohyblivé a pevné elektrody, které tvoří kondenzátory. U akcelerometru se pohyblivá elektroda pohybuje pouze v případě působení vnější síly. V případě gyroskopu je záměrně pohybováno hmotou M, kdy kondenzátory C1 a C2 mají v klidovém stavu stejnou kapacitu. V momentě, kdy se s gyroskopem pootočí, se kapacita kondenzátorů mění v závislosti na Coriolisově síle F proměnné s polohou hmoty M. Tuto změnu lze detekovat, a výstupem struktury je tedy změna kapacity kondenzátorů, která se pomocí elektroniky převádí na jednotku rychlosti otáčení – stupeň za sekundu. [3]

1.3 MEMS Magnetometr

3D senzory magnetického pole snímají intenzitu magnetického pole ve všech třech osách. Využití nalézají například v mobilních telefonech, kde plní funkci digitálního kompasu nebo v aplikacích pro snímání přesné polohy. Jedním z předpokladů správné funkce magnetometru je eliminace okolních rušivých vlivů (baterie, feromagnetické součástky, konektory atd.).

Existuje několik typů MEMS senzorů magnetického pole. Jedny z nevyužívanějších pracují na principu Hallova jevu, kdy se na tenkém kovovém plátku vloženém do magnetického pole měří napětí. Dále se jedná o senzory založené na magnetorezistivitě, magnetickém tunelovém přechodu, anizotropní magnetické rezistenci a jedny z nejnovějších využívají vzniku Lorentzovy síly. [4]

1.4 Bezdrátová komunikace

K zajištění minimální spotřeby bude Wi-Fi modul nahrazen technologií Bluetooth. Jedná se o bezdrátovou komunikaci mezi zařízeními na krátké vzdálenosti (většinou do 10 m). V dnešní době Bluetooth nalézá využití v komunikaci mezi přenosnými počítači, digitálními kamerami, fotoaparáty, mobilními telefony apod.

Bluetooth technologie nahradila starší možnost přenosu pomocí infračerveného světla, jejichž hlavní nevýhodou byla nutnost minimalizovat vzdálenost mezi dvěma komunikujícími objekty a zajištění volného prostoru mezi vysílačem a přijímačem. Tato možnost komunikace navíc s přibývajícím nároky na objem dat nedostačovala rychlostí.

Všechny tyto nevýhody byly odstraněny s příchodem technologie Bluetooth, která jako médium pro přenos dat využívá rádiových vln a nikoliv světla. Navíc komunikuje na velmi vysoké frekvenci – 2,4 GHz, která je zavedena jako standart a všechna zařízení s možností této komunikace jsou navzájem kompatibilní. [5]

1.5 Napájení a nabíjení

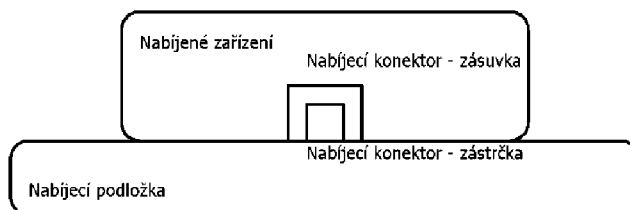
Li-Pol baterie nacházejí využití v zařízeních, kde je kladen důraz na nízkou hmotnost, malé rozměry, velký výkon a možnost rychlého nabíjení. První komerční lithium-polymerové články se na trhu objevily v roce 1996. Jejich technologie vychází ze starších lithium-iontových baterií a jmenovité napětí se tedy pohybuje kolem 3,6 V na článek.

Velkou výhodou je velká výkonnost, malé samovybíjení a nízká hmotnost. Nevýhodou je nutnost používání elektronické ochrany při nabíjení a vybíjení, kdy hodnoty napětí nesmí překročit hranice udávané výrobcem. V opačném případě hrozí poškození článků, v mnoha případech nevratné. Jako další nevýhodu lze brát i jejich mechanickou odolnost. Většina obalů článků je pouze kovová fólie a její proražení může způsobit zkrat, poškození článku, případně i požár. Proto je potřeba dodržovat určitá bezpečnostní pravidla a umístit akumulátor mimo ostré hrany, výkonově zahřívané součástky atp.

Nabíjení ovladače má za úkol zajistit přísun elektrické energie do baterie zařízení. Jedná se o nezbytnou součást každého bezdrátového zařízení. Baterie nejsou schopny dodávat trvalý napájecí proud po celou dobu a časem se vybijí. Důležitou roli hraje maximální nabíjecí napětí (obvykle bývá v rozmezí 4,20 – 4,50 V na článek). Při překročení těchto hodnot může dojít k trvalému poškození akumulátoru, případně i k nadměrnému zahřátí článku a vzplanutí.

Drátové nabíjení

První možností, jak 3D ovladač nabíjet je drátové nabíjení. Jedná se o velmi známý způsob používaný téměř u všech elektronických zařízení. Základem je nabíjecí podložka, na které je umístěna zástrčka konektoru. Nabíjené zařízení se umístí na tuto podložku tak, že dojde k vodivému kontaktu mezi nabíjecí zásuvkou na zařízení a nabíjecí zástrčkou na podložce. Dle typu obvodu se může následující nabíjecí obvod nacházet v podložce nebo v nabíjeném zařízení. V tomto případě by se jednalo pouze o zdroj elektrické energie pro nabíjecí obvod v 3D ovladači.



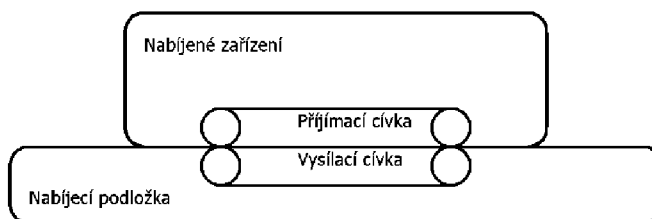
Obrázek 1-3: Princip drátového nabíjení

Bezdrátové nabíjení

Druhou možností, jak prostorový ovladač nabíjet je bezdrátově. Technologie je teprve ve vývoji, nicméně již dnes lze nalézt např. mobilní telefony, které lze nabíjet bezdrátově. Způsob nabíjení je založen na přenosu elektrické energie pomocí magnetického pole. Vysílací cívkou protéká střídavý proud, který způsobí vznik magnetického pole kolem cívky. Toto pole ovlivňuje přijímací cívku tak, že se v ní indukuje elektrický proud.

Tímto způsobem přenosu elektrické energie však vznikají velké ztráty, a pomocí různého tvaru cívek, velikostí protékajícího proudu a vzdálenosti obou cívek je snaha tyto ztráty minimalizovat. Proto bude nabíjený 3D ovladač přímo položen na nabíjecí podložce, aby byla minimalizována vzdálenost mezi cívkami.

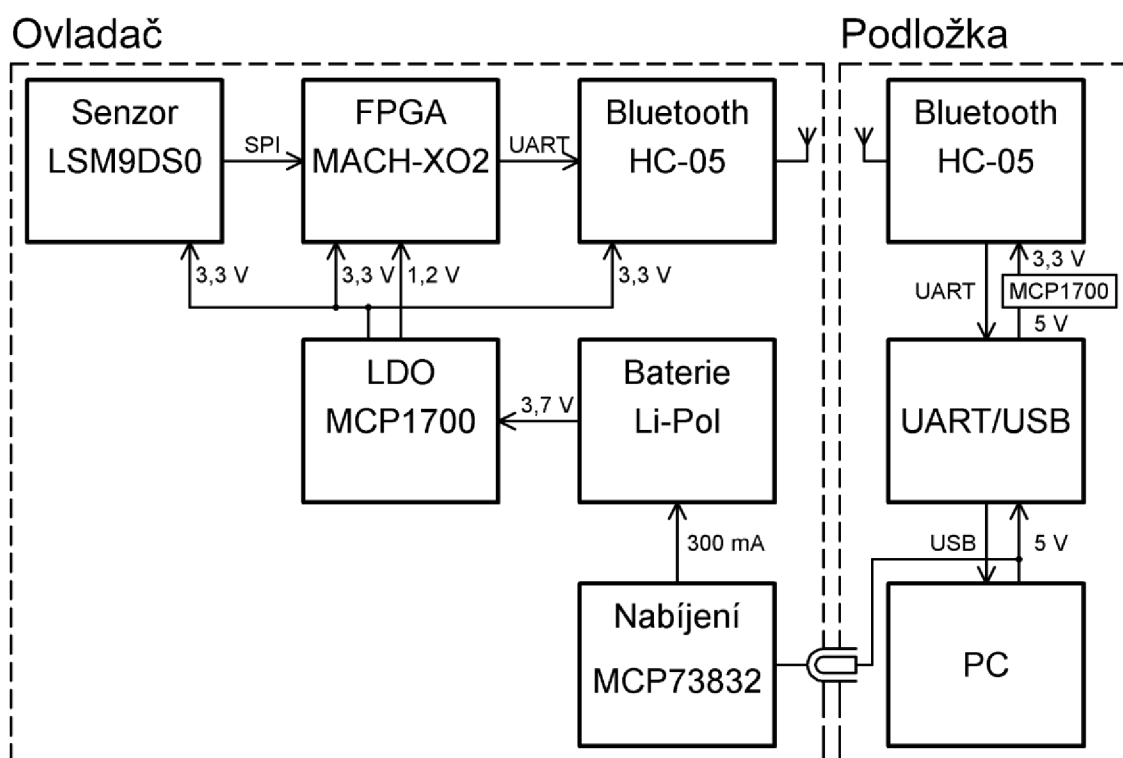
V případě 3D ovladače by se jednalo o nabíjecí podložku s měničem, která by stejnosměrný proud ze síťového adaptéru měnila na střídavý proud pro buzení cívky. Na straně ovladače by za přijímací cívku byl obvod pro usměrnění tohoto proudu, stabilizaci napětí a nabíjecí obvod.



Obrázek 1-4: Princip bezdrátového nabíjení

2 NÁVRH ZAŘÍZENÍ

Celkový systém se skládá ze tří částí: prostorového ovladače, podložky a počítače – viz obrázek 2-1. Počítač plní úlohu přijímacího a napájecího zařízení – komunikuje po USB sběrnici s převodníkem UART/USB v podložce ovladače, který přijímá data z Bluetooth modulu umístěného v nabíjecí podložce a zároveň slouží i jako napájecí blok pro nabíjecí obvod prostorového ovladače. Na povrchu podložky je umístěn napájecí konektor, kterým se ovladač připojuje ke zdroji napětí.



Obrázek 2-1: Blokové schéma celého systému

Samotný prostorový ovladač se skládá z těchto částí:

Senzor LSM9DS0 – snímá údaje o poloze a odesílá je pomocí SPI

Obvod FPGA – zpracovává tyto informace o poloze a dále je předává po sběrnici UART do bezdrátového modulu

Bluetooth modul – modul je spárován s vnějším HC-05 pro bezdrátových přenos zpracovaných údajů o poloze

LDO, Baterie, Nabíjení – podpůrné komponenty zajišťující napájení ovladače

2.1 Výběr komponent

Výběr správných komponent je jedna z nejdůležitějších částí návrhu. Celé zařízení je složeno ze tří hlavních částí. Sensory ovladače jsou: digitální akcelerometr, gyroskop a magnetometr, které odesílají informace o pohybu do druhé části, kterou je obvod FPGA. Obvod FPGA slouží ke zpracovávání údajů ze senzoru a posílání těchto dat do bezdrátového modulu, který je bude předávat do druhého bezdrátového modulu pomocí technologie Bluetooth. Následně bude údaj převeden převodníkem UART/USB do koncového (ovládaného) zařízení, v tomto případě počítače.

2.1.1 Senzor – akcelerometr, gyroskop, magnetometr

Senzor LSM9DS0 je elektronický obvod obsahující 3D digitální lineární akcelerometr, 3D digitální úhlový senzor (gyroskop) a 3D digitální magnetický senzor. Obvod je schopen komunikovat přes sériové rozhraní I2C (standardní a rychlý mód – 100 kHz a 400 kHz) a přes sériové standardní rozhraní SPI (až do rychlosti 10 MHz). Systém může být programově konfigurován tak, aby generoval signály na vývodech určené pro vyvolání přerušení při pohybu a snímání magnetického pole. Tato vlastnost se využívá například pro detekci pádu harddisku. Uživatel si může nastavit hranici hodnot, při které se přerušení vyvolá.

Akcelerometr, magnetometr a gyroskop mohou být odděleně zapínány pro ušetření energie spotřebované obvodem. Senzor se dodává v pouzdře LGA24 o rozměrech 4 x 4 x 1 mm a je garantováno, že je schopen pracovat při teplotách od -40°C do $+85^{\circ}\text{C}$. [6]

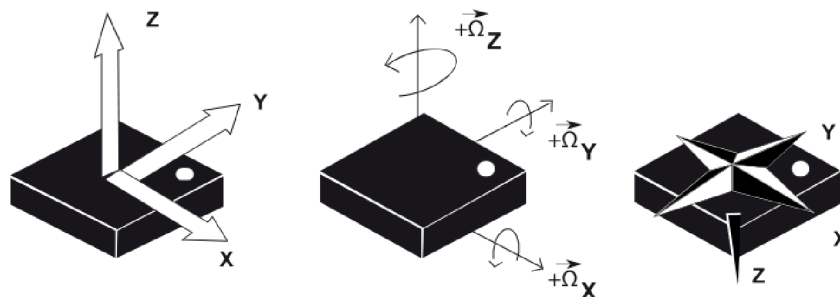
Parametry obvodu:

Rozsah akcelerometru: $\pm 2/\pm 4/\pm 6/\pm 8/\pm 16$ g s lineárním průběhem

Rozsah magnetometru: $\pm 2/\pm 4/\pm 8/\pm 12$ G ($1\text{ G} = 10^{-4}\text{ T}$)

Rozsah gyroskopu: $\pm 245/\pm 500/\pm 2000$ dps (stupňů za sekundu)

16 bitový datový výstup



Obrázek 2-2: Zobrazení funkce jednotlivých senzorů v obvodu, převzato z: [6]

2.1.2 Obvod FPGA

Řídící obvod FPGA, který zajišťuje přenos dat ze senzoru pomocí sběrnice SPI, následné zpracování a odesílání dat do HC-05, byl zvolen od výrobce Lattice Semiconductor z řady MACHXO2. Tato firma totiž jako jedna z mála dodává na trh i větší obvody FPGA v pouzdech s vývody po stranách.

Podle velikosti testovacího designu byl vybrán obvod s 1 200 náhledovými tabulkami, které by měly bez potíží dostačovat pro snímání dat ze senzoru, jejich převedení a následné odeslání ve formátu ASCII do Bluetooth modulu. Při návrhu zařízení byl záměrně vybrán obvod FPGA, jelikož programovatelná hradlová pole v dnešní době konkurují dostupností, cenou a velikostí složitějším mikroprocesorům.

Finální pouzdro obvodu bylo zvoleno TQFP. Firma v této velikost dodává několik typů obvodu, které se liší výhradně počtem náhledových tabulek. Konkrétní obvod má označení **LCMXO2-1200ZE-1TG100C**, tedy řada MACHXO2, 1 200 náhledových tabulek, verze ZE (dvě napájecí napětí, ale nižší spotřeba) a pouzdro TQFP100. Tento obvod disponuje FLASH pamětí, do které je nahrán příslušný bitový soubor pro správnou funkci obvodu. [7]

2.1.3 Bluetooth modul

Pro přenos dat mezi koncovým zařízením a ovladačem byl zvolen Bluetooth modul HC-05. Jedná se o Bluetooth SPP (Serial Port Protocol) modul, který je navržen pro přenášení dat mezi dvěma zařízeními. Vstupní data jsou ve formátu sběrnice UART a při spárování moduly fungují tak, že poslaná data na jedné straně se objeví na straně druhé. Verze Bluetooth je 2.0 a pracuje na frekvenci 2,4 GHz. Nahrazení Wi-Fi modulu bylo provedeno výhradně z důvodu snížení spotřeby celého zařízení.



Obrázek 2-3: Bluetooth modul HC-05

Továrně nastavený modul komunikuje rychlostí 38 400 bps, 8 datovými bity, 1 stop bitem a bez parity. Podporované rychlosti jsou v rozsahu od 9 600 do 460 800 bps. Modul může být napájen napětím od 1,8 V do 3,6 V. V ovladači je pro něj využito napájecího napětí 3,3 V. [8]

2.1.4 Nabíjecí obvod

Vzhledem k tomu, že se baterie musí po určité době provozu nabíjet, bylo třeba zvolit vhodný nabíjecí obvod. Základním parametrem byla jednoduchost obvodu, a proto byl vybrán nabíjecí obvod Li-Pol/Li-Ion baterií pod označením MCP73832. Tato zařízení nabíjejí metodou CCCV, tedy metodou, která je vhodná právě pro Li-Pol akumulátory z důvodů jejich velké citlivosti na maximální napětí. Při jeho překročení může dojít k přehřátí, v některých případech i ke vzplanutí akumulátoru. Správné nabíjení je tedy základním předpokladem pro dodržení bezpečnosti při používání Li-Pol baterií.

Konkrétní verze nabíjecího obvodu - MCP73832-ACI/OT má maximální výstupní napětí baterie 4,20 V. Obvod je dodáván v pouzdru SOT-23 s pěti vývody, určen je tedy pro povrchovou montáž na desku plošných spojů. Největším problémem při návrhu zařízení bude dodržení vstupního napětí pro obvod – 5 V. Při řešení nabíjení pomocí konektoru se do nabíjecí podložky umístí stabilizátory pro přesné nastavení výstupního napětí. Při bezdrátovém nabíjení bude potřeba zajistit dostatečný výstupní výkon přijímací cívky.

Parametry:

Velmi přesné nastavení maximálního napětí ($4,20 \pm 0,75\%$)

Programovatelný nabíjecí proud (max. 500 mA)

Automatické vypnutí při poklesu vstupního napětí [9]

V případě prostorového ovladače se jedná o uzavřený plastový obal, proto bude nabíjecí proud omezen dostatečně vhodně pro zamezení překročení hraničních hodnot ztrátového výkonu a následně teploty obvodu (300 mA).

Obvod je umístěn na samostatné desce plošných spojů (nabíjecího modulu) s ostatními doplňujícími součástkami pro zajištění napájení celého ovladače. Vzhledem k tomu, že obvod FPGA potřebuje ke své funkci dvě napájecí napětí, jsou na této desce umístěny dva lineární stabilizátory s výstupním napětím 3,3 V pro napájení vstupů a výstupů a 1,2 V pro napájení jádra obvodu.

2.1.5 Li-Pol baterie

Jako zdroj energie celého zařízení bude použita Li-Pol baterie pod označením L503759 od výrobce CELLEVIA BATTERIES, která má nominální napětí 3,7 V na článek. Toto napětí je dostačující pro obvod FPGA, senzor a bezdrátový modul. Některé obvody FPGA mají oddělené napájení jádra, které je typicky 1,2 V. Pro toto napětí bude potřeba za baterii vložit stabilizátor, na jehož výstupu bude právě toto napětí. Kapacita baterie je výrobcem garantována 850 mAh.

Spotřeba zařízení byla zjištěna měřením. Průměrně ovladač odebírá 37 mA,

ve špičce až 51 mA (jedná se o velmi krátký časový úsek). Pro úplné vyčerpání baterie by obvod musel být napájen po dobu cca 21 hodin. Standardní využití ovladače se předpokládá na maximálně 8 hodin a poté by měl být nabíjen. Zvolená baterie tedy dostičuje s více než dvojnásobnou rezervou kapacity.

Akumulátor má rozměry 30 x 40 x 6 mm a vývody jsou kabelové s konektorem. Tento konektor je ponechán a na napájecí desku bude připojen pomocí hřebíkových vývodů.



Obrázek 2-4: Akumulátor Li-Pol 850 mAh

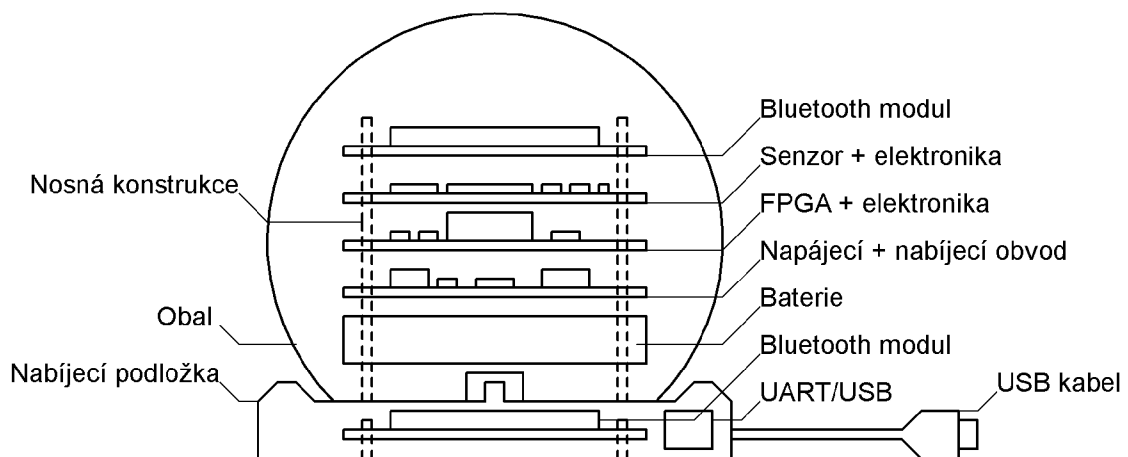
2.1.6 Ostatní součástky

Z důvodu minimalizace rozměrů ovládací elektroniky jsou pro většinu součástek zvolena povrchově montovaná pouzdra. Jako základní materiál je použito více desek plošných spojů. Modul v podložce, nabíjecí modul a deska s obvodem FPGA jsou na oboustranné desce z důvodu lepšího odvádění tepla do okolí. Ostatní moduly jsou umístěny na jednostranných deskách plošných spojů.

2.2 Elektromechanický návrh zařízení

Návrh zařízení je nezbytnou součástí výrobního procesu. Po výběru komponent je nutné zvolit jejich vhodné uspořádání ve finálním výrobku.

Návrh vnitřního uspořádání ovladače je znázorněn na obrázku 2-5. Jednotlivé moduly budou na sebe skládány do vrstev na nosné konstrukci. Jednotlivé desky plošných spojů mají v rozích umístěny díry pro distanční sloupky, které zajistí mechanické spojení všech modulových desek. Elektrické propojení mezi jednotlivými deskami je tvořeno prodlouženými pinovými hřebínky.



Obrázek 2-5: Grafický návrh celé sestavy 3D ovladače

2.2.1 Mechanický návrh

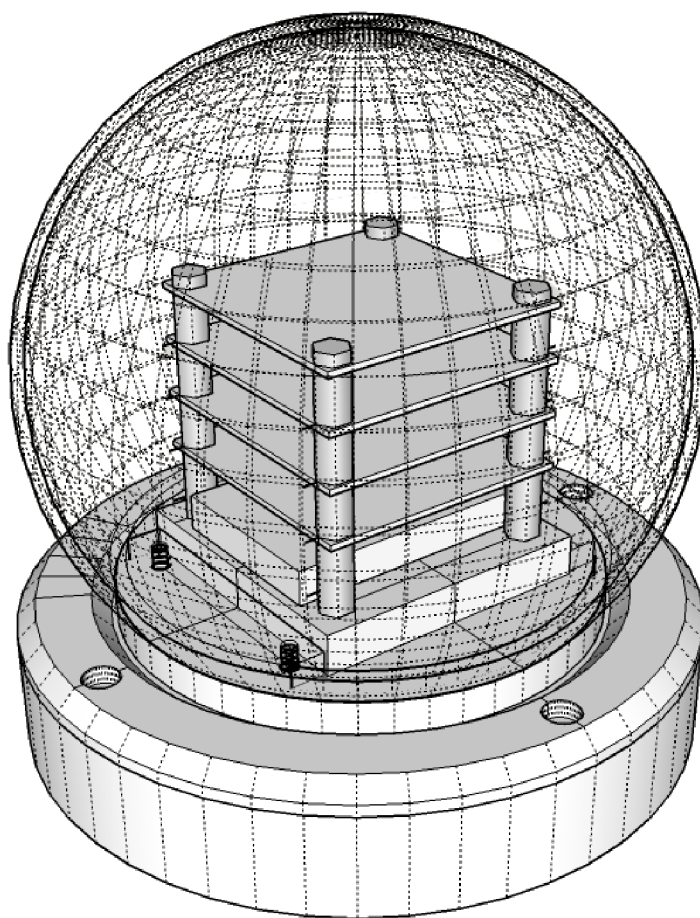
Ovladač je umístěn v plastovém obalu, na jehož výrobu byla využita 3D tiskárna. Úkolem plastového obalu je chránit vnitřní elektroniku proti mechanickému poškození a zajistit pohodlné uchopení ovladače. První verze obalu ovladače je jednoduše rozebíratelná. Velikost je jednou z velmi důležitých vlastností. Je nutné dbát na to, aby bylo zařízení pohodlné na používání, ovšem bylo dostatečně velké pro elektroniku a napájení.

Materiál, ze kterého je obal ovladače vyroben je PLA plast. PLA plast je pevný, ale navlhá a při nižších teplotách měkne. To však není omezení při předpokládaném využití 3D ovladače, kde budou tyto faktory eliminovány. 3D tisk umožňuje velmi rychlé úpravy, jelikož odpadá nutnost výroby forem. 3D tisk na výrobku zanechá strukturu jednotlivých vrstev, které bude třeba odstranit povrchovými úpravami – broušením a leštěním pro hladký a lesklý povrch.

Ovladač je ve tvaru koule se zarovnanou podstavou. Podstava je zarovnaná z důvodu zamezení nechtěného pohybu při odložení ovladače. Nevýhodou této verze je pouze jedna rovná plocha – při odložení jinak než na tuto plochu dojde k pohybu

a případně i k pádu zařízení a následnému poškození. Jednou z výhod je naopak velikost rovné plochy – větší prostor pro umístění vypínače a nabíjecího konektoru.

Celý obal zařízení včetně nabíjecí podložky je rozdělen na 4 části. Nejdůležitější částí je spodní podstava ovladače, na které je umístěn konektor pro nabíjení, vypínač a montážní otvory pro uchycení distančních sloupků desek plošných spojů a pro připojení horního obalu ovladače. Návrh byl proveden v programu SketchUp, určeném pro vytváření a úpravu 3D modelů.

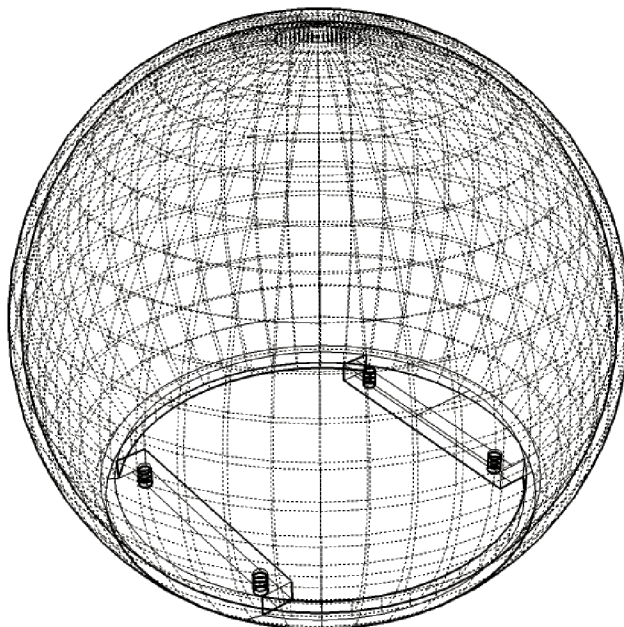


Obrázek 2-6: Grafický návrh sestavy

Průměr koule je cca 95 mm a rovná část podstavy je asi 6 mm vysoká. Pro jednoduché uložení do nabíjecí podložky byla na povrchu podložky vytvořena snížená oblast. Veškeré mechanické spoje jsou zajištěny pomocí M3x12 imbusových šroubů, které zajišťují možnost jednoduchého a rychlého rozložení ovladače.

Vrchní obal ovladače

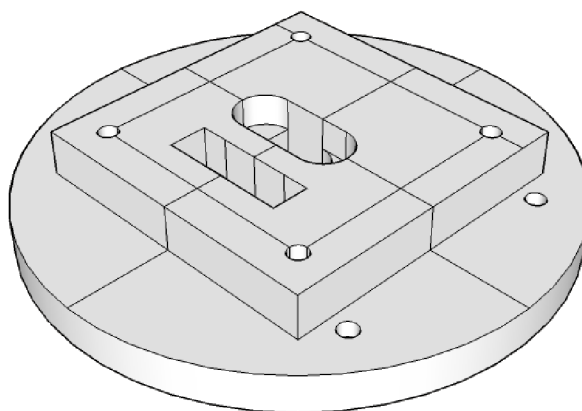
Krycí obal ovladače je navržen jako dutá koule s tloušťkou stěny 3 mm s rozšířenou základnou na spodu pro uchycení k spodní desce.



Obrázek 2-7: Vrchní obal ovladače

Spodní deska ovladače

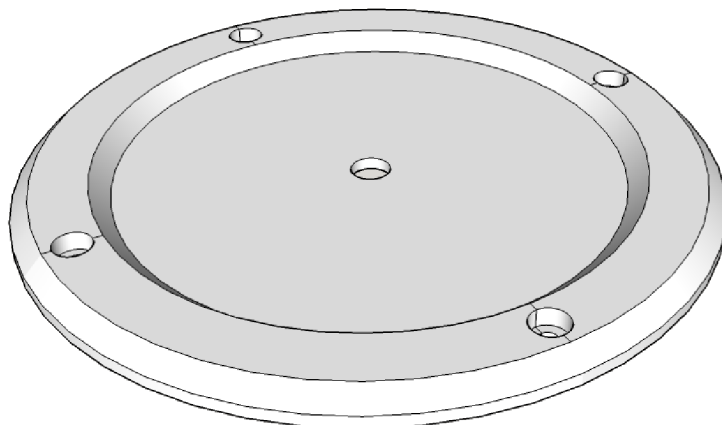
Deska byla navržena tak, aby na ni bylo možné uchytit jednotlivé desky plošných spojů a horní kryt ovladače. Uprostřed byl vytvořen otvor pro umístění nabíjecího konektoru a vypínače.



Obrázek 2-8: Spodní deska ovladače

Horní deska podložky

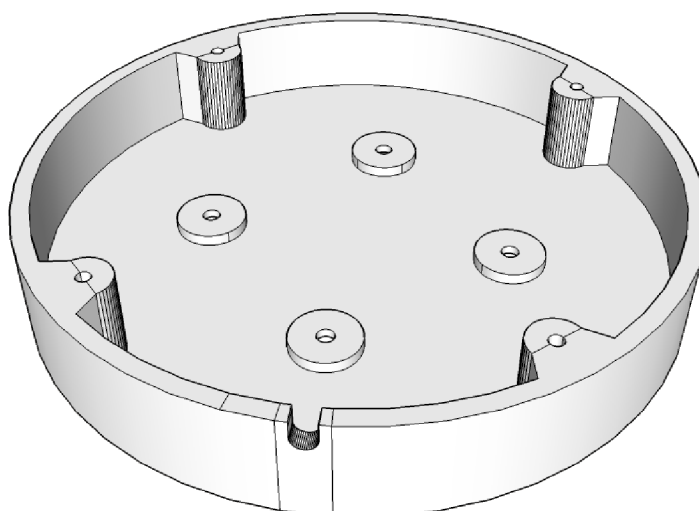
Horní deska podložky má vytvořeny jakýsi „žlab“ pro pohodlné umístění zařízení na nabíjecí podložku. Na desce jsou do kříže navrhnuty otvory pro mechanické spojení se spodní deskou podložky pomocí M3 imbusových šroubů. Mezi těmito otvory se nachází 12 slepých děr pro informační LED diody.



Obrázek 2-9: Horní deska podložky

Spodní část podložky

Jako základna pro nabíjecí podložku slouží právě spodní část (miska). Po stranách jsou umístěny díry se závity pro montáž horní desky podložky a uprostřed misky jsou navrženy distanční podložky pro připevnění desky plošných spojů s Bluetooth modulem. Na jedné straně se nachází výřez pro provlečení napájecího USB kabelu.



Obrázek 2-10: Spodní deska podložky

2.2.2 Elektrický návrh

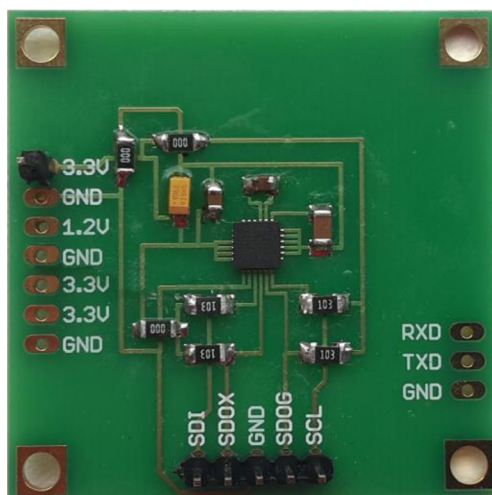
V této části práce je popsán návrh a popis desek plošných spojů pro správnou funkci prostorového ovladače. Jednotlivé desky jsou čtvercového tvaru se stranou délky 47 mm. Zařízení je osazeno čtyřmi deskami a každá má svoji specifickou funkci. Uspořádání jednotlivých desek je znázorněno na obrázku 2-5.

Každý modul ovladače má na jeho levé straně umístěno sedm napájecích děr, které umožňují vzájemnou zaměnitelnost desek. Tento konektor pro napájení je umístěn ve středu mezi děrami pro mechanický spoj tak, aby vzájemně navazoval na konektory ostatních desek a nedošlo u něj k posuvu.

Modul s obvodem LSM9DS0

Základní modul, na kterém se nachází digitální senzor LSM9DS0, je umístěn jako druhý z vrchu ovladače. Při návrhu zařízení byla snaha tento senzor umístit co nejbližší středu ovladače tak, aby byl zajištěn nulový posun při pohybu zařízení. Schéma tohoto obvodu je uvedeno v příloze A.1.

Ve střední části se nachází obvod LSM9DS0 označený jako U1 v pouzdru LGA24. Kondenzátory C3 a C4 slouží k filtraci a vyhlazení napájecího napětí dodávaného ze spodního modulu. Kapacity C1 a C2 jsou připojeny podle doporučeného zapojení z katalogového listu a slouží k zajištění správné funkce obvodu. Je nutné použít keramické kondenzátory s nízkým sériovým odporem.



Obrázek 2-11: Modul s obvodem LSM9DS0

Rezistory R1, R2, R3 a R4 nejsou pro správnou funkci důležité, ale je lepší je na desku osadit. Jejich funkce spočívá v udržování stabilní napěťové hladiny na signálových vodičích – tzv. pull-up rezistory.

Napájení desky zajišťuje konektor SV2, na kterém je využito prvních dvou pinů pro uzemnění (GND) a napájení (3,3 V). Signálové vedení je zajištěno konektorem SV1, který má mimo signály pro SPI rozhraní také GND vodič za účelem zlepšení signálové integrity.

Modul s obvodem FPGA

Hlavní řídicí obvod FPGA od firmy Lattice Semiconductor je umístěn na desce nad napájecím modulem. Více o obvodu je uvedeno v kapitole 2.1.2. Na desce bylo nutné zajistit dvě úrovně napětí – 3,3 V pro vstupy a výstupy obvodu a 1,2 V pro napájení jádra obvodu. Dále se zde nachází oscilátor U1 s frekvencí 50 MHz jako zdroj hodinového signálu obvodu FPGA. Schéma zapojení je uvedeno v příloze A.2.

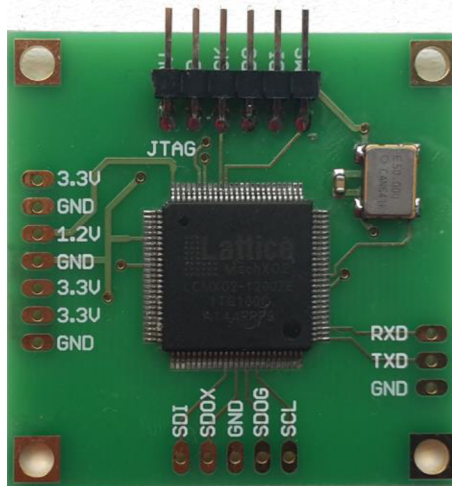
Konektor SV3 zajišťuje přívod napájení ze spodního napájecího modulu. Pro programování obvodu je využito rozhraní JTAG a jeho zapojení je uvedeno ve vrchní části schématu. Rezistory R1, R2, R3 a R4 slouží k udržení stabilní napěťové úrovně stejně jako v případě digitálního senzoru. Podrobné zapojení vývodů FPGA obvodu je uvedeno v tabulce 2-1.

Tabulka 2-1: Zapojení jednotlivých pinů obvodu FPGA

Označení pinu	Funkce	Popis
P27	SCS	chip select signál SPI
P36	SCL	hodinový signál pro řízení SPI
P38	SDO(G)	výstupní data gyroskop z LSM9DS0
P40	SDO(XM)	výstupní data acc/mag z LSM9DS0
P42	SDA	vstupní data do LSM9DS0
P51	UART_TXD	TXD obvodu HC-05
P53	UART_RXD	RXD obvodu HC-05
P61	RST	resetovací pin obvodu
P63	CLK_50MHZ	vstupní řídicí hodinový signál

Pro komunikaci mezi obvodem FPGA a senzorem LSM9DS0 je využito rozhraní SPI. Propojení jednotlivých desek pro vzájemnou komunikaci zajišťuje konektor SV2 a pro připojení Bluetooth modulu HC-05 slouží konektor SV4.

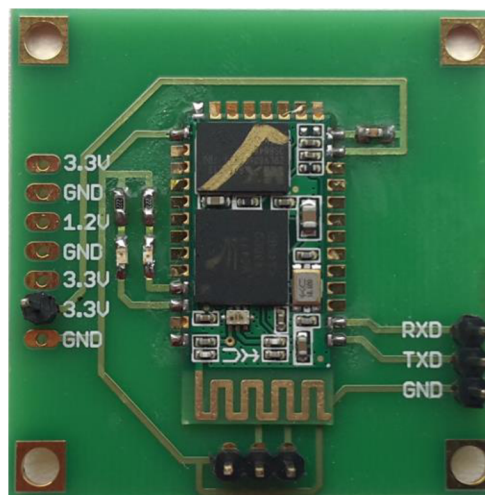
Všechny ve schématu uvedené kondenzátory poskytují filtraci vstupního napájecího napětí 3,3 V a pouze kapacity C2 a C3 filtrují 1,2V úroveň. Obvod IC2 funguje jako automatický reset obvodu FPGA po dobu 210 ms.



Obrázek 2-12: Modul s obvodem FPGA

Modul s Bluetooth modulem HC-05

Zde jde o velmi jednoduchou desku, kde hlavním obvodem je Bluetooth modul HC-05. Napájení pomocí 3,3 V zajišťuje konektor SV2 a k filtraci tohoto napětí slouží keramický kondenzátor C1. Rezistory R1 a R2 slouží k omezení proudu do informačních LED diod, které nebudou ve finálním výrobku osazeny, aby došlo ke snížení spotřeby celého zařízení. Konektorem SV1 se obvod uvádí do režimu AT příkazů a SV3 slouží k přenosu dat po sériové lince UART do obvodu FPGA. Schéma desky je uvedeno v příloze A.3.



Obrázek 2-13: Deska s Bluetooth modulem HC-05

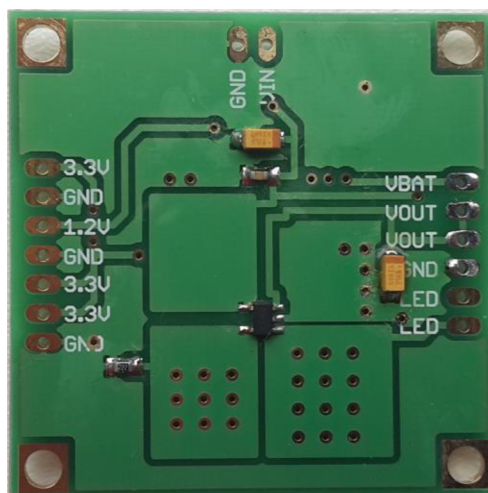
Napájecí deska ovladače

Tato deska zajišťuje nabíjení baterie, zapínání a vypínání celého zařízení a vytvoření napájecího napětí pro všechny ostatní bloky. Integrovaný obvod MCP73832 je napájen ze vstupního konektoru mezi podložkou ovladače a samotným ovladačem, tedy 5 V z USB. Kapacity C1 a C2 slouží k filtraci tohoto vstupního napájení. Rezistor

R1 omezuje proud protékající signalizační LED diodou, která zobrazuje aktuální stav nabíjecího procesu. Rezistorem R2 je nastaven maximální nabíjecí proud do baterie na hodnotu asi 300 mA podle vzorce z katalogového listu, která byla zvolena na základě standardního proudu, které dodává USB konektor. Schéma obvodu je uvedeno v příloze A.4.

Výstupní napětí 3,3 V a 1,2 V zajišťují lineární stabilizátory od firmy Microchip typu MCP1700T. Jejich maximální dodávaný proud je 250mA. Tyto obvody byly zvoleny z důvodu nízkého napěťového úbytku. (cca 250 mV). Kondenzátory C3 až C11 slouží k filtraci jednotlivých napěťových úrovní. Keramické typy byly zvoleny z důvodu nízkého sériového odporu a tantalové potom pro jejich vysokou kapacitu.

Konektor SV1 slouží k distribuci napěťových úrovní po celém zařízení. Vstupní konektor SV2 je určen pro připojení zásuvky umístěné zespod zařízení, která zajišťuje napájení nabíjecího obvodu při odložení zařízení na podložku, a SV3 slouží k připojení vypínače, informační LED diody a baterie.



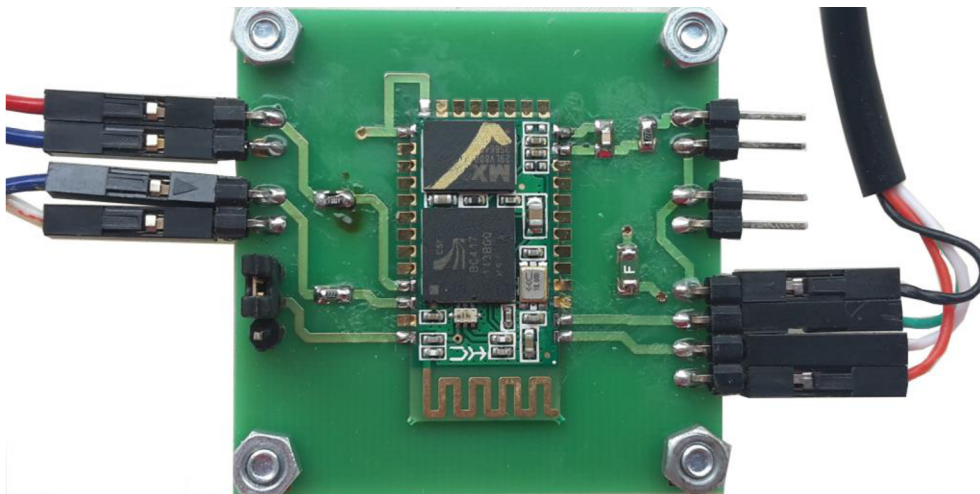
Obrázek 2-14: Napájecí deska ovladače

Deska odkládací a přijímací podložky

Poslední deska je uložena mimo samotný 3D ovladač v odkládací podložce. Jedná se o desku zajišťující 3,3 V napájení pro druhý HC-05 modul, který předává informace do koncového zařízení. Vstupním konektorem se do podložky dodává napájecí napětí z USB, 5V větev je jištěna vratnou pojistkou se jmenovitým proudem 0,5 A pro ochranu USB u počítače. UART_RX a UART_TX jsou signály z převodníku USB/UART, který je uložen vedle desky a zajišťuje komunikaci mezi počítačem a Bluetooth modulem. Schéma zapojení je uvedeno v příloze A.5.

Napájecí napětí 5 V je přivedeno na vstup lineárního napěťového regulátoru MCP1700T, na jehož výstupu je požadovaných 3,3 V pro modul HC-05. Všechny kondenzátory uvedené ve schématu slouží k filtraci napájecího napětí.

Deska má 3 výstupy pro informační LED diody, z nichž budou využity jen dva pro zobrazení přítomnosti napájecího napětí a činnost Bluetooth modulu. Rezistory u těchto LED diod slouží k omezení protékajícího proudu diodami a konektor SV2 je určen k přechodu modulu do režimu AT příkazů, podobně jako u desky v ovladači.



Obrázek 2-15: Deska odkládací a přijímací podložky

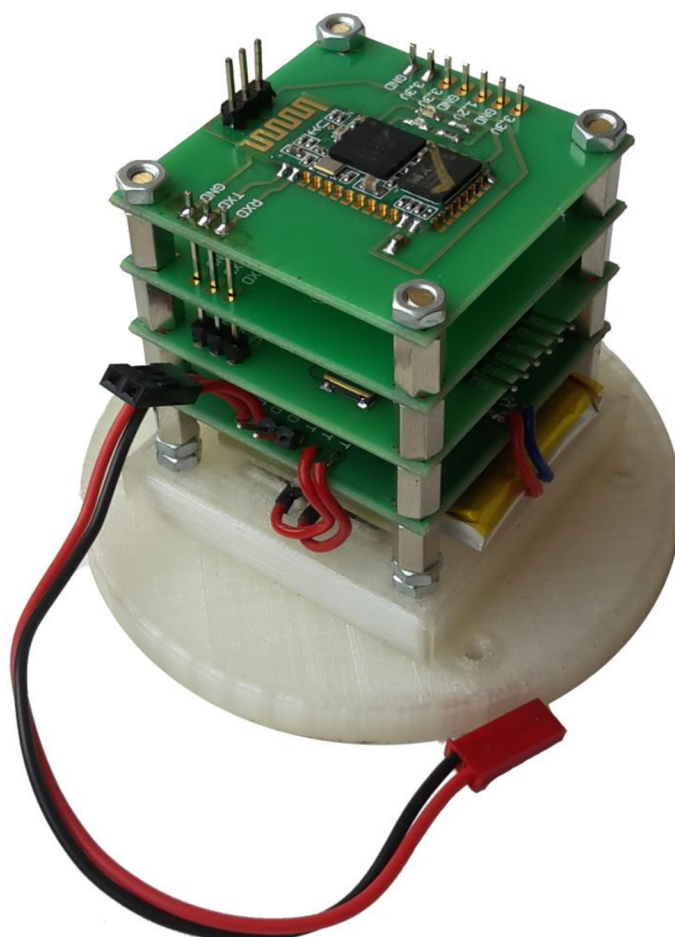
2.3 Konstrukce ovladače

Po návrh, osazení a otestování desek pomocí výukového kitu s FPGA Spartan 3 byly desky očištěny a nachystány pro kompletaci do finální podoby v ovladači. Navržené díly pro ovladač byly vytisknuty na 3D tiskárně, následně očištěny a použity.

Celkovou kompletaci ovladače lze rozdělit do následujících kroků:

1. Vylomení desek plošných spojů z přířezu a jejich začištění
2. Osazení desek příslušnými součástkami uvedených v seznamu součástek
3. Očištění a vizuální inspekce desek plošných spojů
4. Testování jednotlivých modulů pomocí měřících přístrojů
5. Naprogramování Bluetooth modulu. Viz: kapitola č.3.1
6. Výroba plastových dílů na 3D tiskárně
7. Mechanické očištění vytisknutých dílů od otřepů
8. Usazení vypínače a nabíjecího konektoru do spodní desky ovladače
9. Napájení jednotlivých vodičů
10. Uložení sklolaminátové destičky pod baterii – zajištění mechanické ochrany
11. Usazení baterie na tuto destičku pomocí oboustranné lepicí pásky
12. Vložení M3x20 imbusových šroubů pro uchycení desek plošných spojů
13. Vložení vymezovacích matic a distančních sloupků
14. Připevnění jednotlivých DPS na distanční sloupky a jejich vzájemné nakontaktování pomocí hřebínkových vývodů

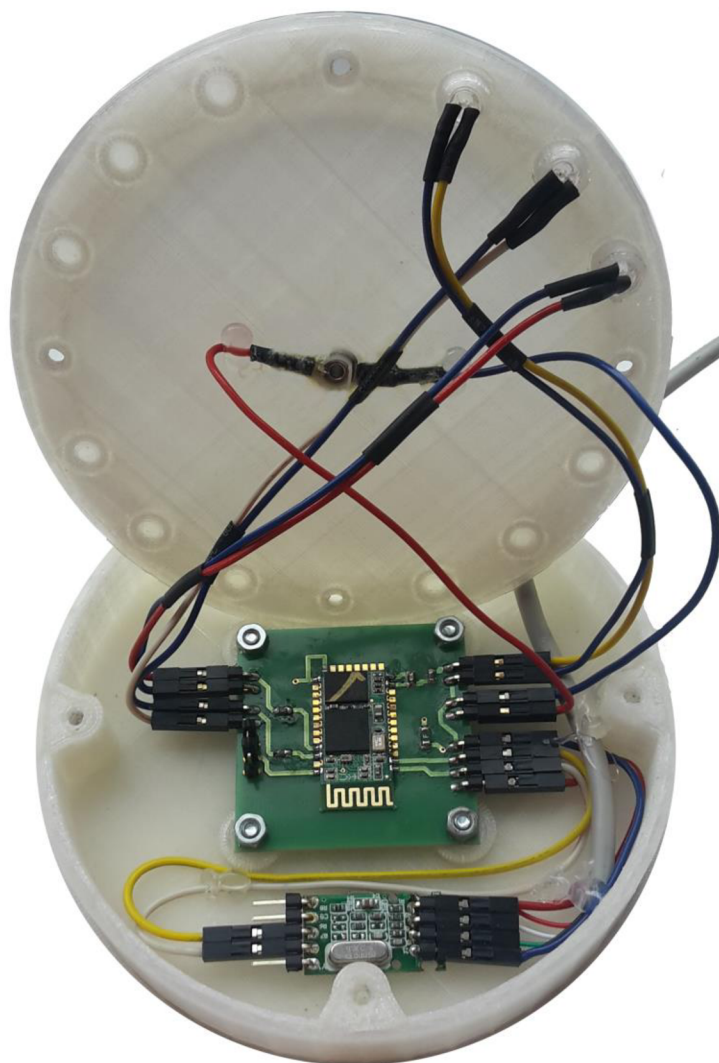
15. Montáž indikace nabíjení - LED diody do vrchní části obalu ovladače
16. Nahrání FLASH paměti v obvodu FPGA
17. Připevnění vrchní části ovladače pomocí M3x10 imbusových šroubů



Obrázek 2-16: Sendvičová struktura ovladače

Kompletaci podložky lze rozdělit do následujících kroků:

1. Vylomení desek plošných spojů z přířezu a jejich začištění
2. Osazení desek příslušnými součástkami uvedených v seznamu součástek
3. Očištění a vizuální inspekce desek plošných spojů
4. Naprogramování Bluetooth modulu. Viz: kapitola č.3.1
5. Výroba plastových dílů na 3D tiskárně
6. Mechanické očištění vytisknutých dílů od otřepů
7. Usazení DPS podložky a převodníku USB/UART
8. Kontaktování jednotlivých LED diod podložky a nabíjecího konektoru
9. Připojení USB kabelu a distribuce napájení
10. Montáž horní desky na misku podložky pomocí M3x10 imbusových šroubů



Obrázek 2-17: Vnitřní uspořádání nabíjecí podložky

Jednotlivé komponenty v nabíjecí podložce byly propojeny pomocí krimpovacích konektorů tak, aby byla zajištěna možnost rychlého rozebírání a případné úpravy vnitřních částí podložky. Ve vrchní části jsou umístěny tři LED diody. Zelená signalizuje přítomnost napájecího napětí z USB. Modrá znázorňuje úspěšné spárování Bluetooth modulů a červená LED dioda signalizuje stav Bluetooth modulu.

3 FIRMWARE A SOFTWARE

Následující část práce se zabývá programovou částí ovladače včetně párování a nastavení Bluetooth modulů. Pro základní komunikaci bylo nutné naprogramovat modul pro SPI komunikaci senzoru a modul pro UART komunikaci pro bezdrátový Bluetooth modul. Dále je zde popsán vnitřní obvod FPGA, který nastavuje funkci senzoru, přijímá z něj data a přenáší je do počítače pomocí dvou spárovaných Bluetooth modulů a převodníku UART – USB, kterým je vybavena odkládací podložka.

3.1 Programování a párování Bluetooth modulů

Na desce v ovladači jsou pro vstup do programovacího módu určeny piny SV1 a na přijímací podložce piny SV2. Před zapnutím je nutné střední kolík spojit s příslušným vedlejším kolíkem, na kterém je napětí 3,3 V. Po zapnutí napájení je modul v režimu AT příkazů s komunikační rychlostí 38 400 bps, bez parity a s jedním stop bitem.

Tabulka 3-1: Přehled použitých AT příkazů pro modul HC-05

Příkaz	Popis
AT	Testovací AT příkaz – vrátí OK
AT+NAME=XXXX	Nastavení názvu pro modul
AT+PSWD=XXXX	Nastavení přístupového kódu modulu
AT+UART=XXX,Y,Z	Nastavení rychlosti přenosu, kde: XXX – rychlost v bps Y – 0 ... 1 stop bit, 1 ... 2 stop bity Z – 0... bez parity, 1... lichá parita, 2... sudá parita
AT+ROLE=X	Nastavení role modulu, kde: X – 0... slave, 1... master
AT+ADDR?	Výpis adresy modulu
AT+ORGL	Reset do výchozího nastavení
AT+RMAAD	Odpojení od všech předchozích párů
AT+INIT	Inicializace připojení
AT+INQ	Vyhledání dostupných zařízení
AT+LINK=XXX	Spárování s. Kde: XXX... adresa slave modulu

Programování probíhalo následujícím způsobem. Nejprve byl nastaven modul v ovladači. Po připojení přes převodník USB/UART byl nastaven patřičný komunikační protokol v počítači a na konec každého příkazu automaticky přidán CR + LF byte.

Postup nastavení Bluetooth modulu v ovladači:

1. Zkratování středního kolíku konektoru SV1 na napájecí napětí 3,3 V.
2. Zapojení všech signálových a napájecích vodičů.
3. Přejít do AT režimu signalizuje pomalu blikající LED dioda.
4. Příkaz **AT** – odpověď **OK**. Modul je správně připojen.
5. Příkaz **AT+NAME=3D_CON_TRANSMITTER** – odpověď **OK**.
6. Příkaz **AT+PASW=8531** – odpověď **OK**.
7. Příkaz **AT+UART=38400,0,0** – odpověď **OK**. Nastavení rychlosti.
8. Příkaz **AT+ROLE=0** – odpověď **OK**. Nastavení jako podřadný modul.
9. Příkaz **AT+ADDR?** – odpověď **ADDR=2016:1:182214**.
10. Odpojení napájení, zkratování středního kolíku SV2 na zem a opětovné připojení napájení. Signalizační LED bliká rychle – čekání na pár.

Posledním příkazem byla zjištěna adresa zařízení pro párování s přijímacím modulem v podložce.

Postup nastavení Bluetooth modulu v přijímací podložce.

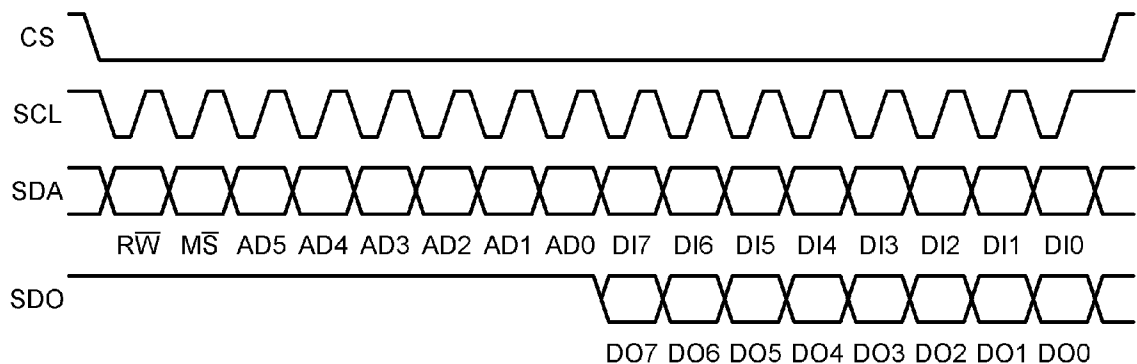
1. Zkratování středního kolíku konektoru SV1 na napájecí napětí 3,3 V.
2. Zapojení všech signálových a napájecích vodičů.
3. Přejít do AT režimu signalizuje pomalu blikající LED dioda.
4. Příkaz **AT** – odpověď **OK**. Modul je správně připojen.
5. Příkaz **AT+NAME=3D_CON_RECIEVER** – odpověď **OK**.
6. Příkaz **AT+PASW=8531** – odpověď **OK**.
7. Příkaz **AT+UART=38400,0,0** – odpověď **OK**. Nastavení rychlosti.
8. Příkaz **AT+ROLE=1** – odpověď **OK**. Nastavení jako master.
9. Příkaz **AT+RMAAD** – odpověď **OK**. Odpojení od všech párů.
10. Příkaz **AT+INIT** – odpověď **OK**. Inicializace připojení.
11. Příkaz **AT+INQ** – odpověď **+INQ:2016:1:182214,XXXX,XXXX**.
12. Příkaz **AT+LINK=2016,1,182214** – signalizační LED diody na modulech začnou blikat synchronizovaně – správně spárováno.
13. Odpojení napájení, zkratování středního kolíku SV2 na zem a opětovné připojení napájení. Signalizační led bliká synchronizovaně.

Tímto nastavením jsou oba dva moduly spárované mezi sebou a při každém připojení napájení budou čekat na vzájemnou komunikaci. Po propojení modulů se rozsvítí druhá signalizační LED dioda. Moduly jsou teď v přenosovém módu, to znamená, že data na vstupní straně se objeví na výstupní a naopak.

3.2 Modul SPI komunikace – obvod FPGA

Senzor LSM9DS0 komunikuje s řídicím obvodem FPGA pomocí protokolu SPI. Jedná se o sériové periferní rozhraní, které je snadné na realizaci a dostatečně rychlé pro přenos dat. SPI komunikace se využívá u většiny digitálních obvodů nebo senzorů, které poskytují data v binární podobě. Dochází tak k výraznému snížení potřebných pinů a redukci potřebného místa pro daný obvod.

Podle katalogového listu každého digitálního obvodu, který je vybaven SPI rozhraním, je nalezena konkrétní sekvence jednotlivých bitů a každý modul musí být upraven tak, aby tuto sekvenci dodržoval. Pro obvod LSM9DS0 platí sekvence popsaná na obrázku 3-1. Vstupní i výstupní data jsou platná na nástupné hraně signálu SCLK, který je výstupem obvodu FPGA a řídí obě komunikující zařízení. Při sestupné hraně signálu se data změň na následující požadovanou hodnotu.



Obrázek 3-1: Protokol SPI obvodu LSM9DS0, převzato z: [6]

Význam jednotlivých bitů:

bit 0 – RW – pro čtení 1, pro zápis 0

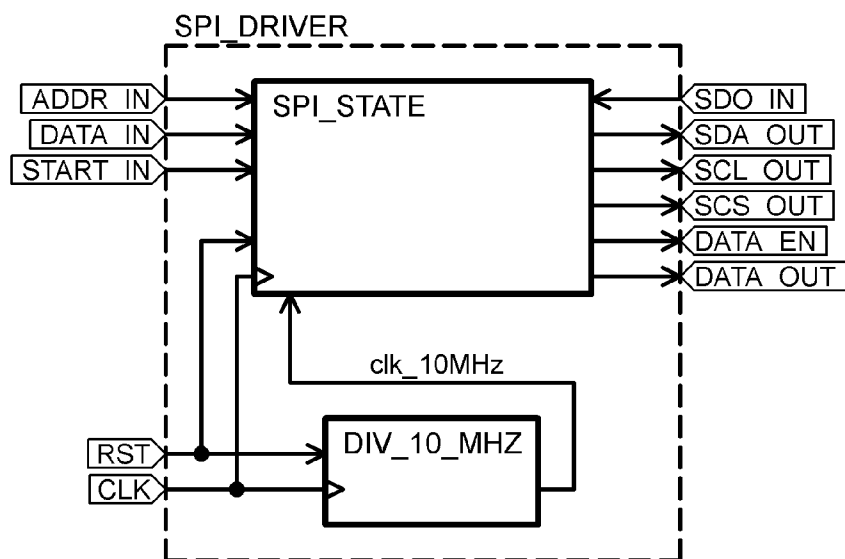
bit 1 – MS – při 0 se adresa neinkrementuje, při 1 se adresa inkrementuje a obvod pošle první adresovaný byte a druhý byte s adresou vyšší o 1.

bit 2-7 – adresa AD(5:0) – adresace jednotlivých registrů

bit 8-15 – DI(7:0) – vstupní data do obvodu platná při RW = 0

bit 8-15 – DO(7:0) – výstupní data z obvodu platná při RW = 1

Modul pro SPI komunikaci byl otestován na vývojové desce k obvodu FPGA Spartan 3 a na testovací desce senzoru LSM9DS0. Schéma ovladače je zobrazeno na obrázku 3-2. Z katalogového listu senzoru bylo zjištěno, že maximální rychlost SPI komunikace může být 10 MHz. Pro tento návrh byla zvolena frekvence 5 MHz.



Obrázek 3-2: Schéma modulu SPI komunikace

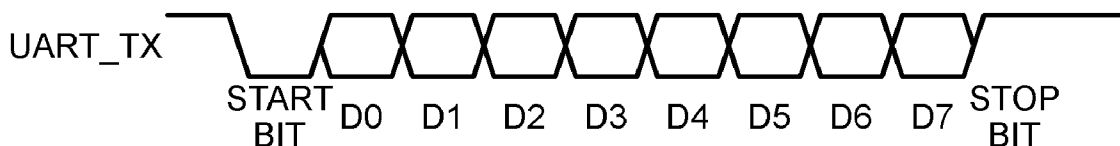
Základem modulu je komponenta SPI_STATE. Jedná se o stavový automat, který má základní stav IDLE, ve kterém čeká na příchozí signál START. Přejde-li tento signál, stavový automat se spustí a na základě prvního bitu vektoru ADDR_IN rozhodne, zda se jedná o čtení nebo zápis. V případě, že se jedná o zápis, následuje po odeslání adresy sekvence 8 krát 2 stavy pro zápis do zařízení, kde zapsaným vektorem je vstupní vektor DATA_IN. Ve druhém případě, kdy se jedná o čtení, je odeslána adresa čteného registru. Po tomto odeslání obvod FPGA nastaví na výstup SCS log. 0 a začne vytvářet pulzy SCLK v počtu 16 period, kde prvních 8 je určeno k odeslání adresy a druhých 8 je určeno ke čtení nebo odesílání dat. Po ukončení přenosu je na výstup SCS zpět nastavena log. 1, která senzoru potvrdí ukončení přenosu.

Jednotlivá příchozí data ze zařízení jsou vyhodnocena a uložena ve vektoru DATA_OUT(7:0), který je v případě úspěšného naplnění potvrzen signálem DATA_EN. Při tomto potvrzení je stavový automat uveden do počátečního stavu IDLE a čeká na další signál START.

Podpůrná komponenta DIV_10_MHZ je jednoduchá dělička 1:5, která na základě příchozího hodinového signálu 50 MHz vytvoří hodinový signál s frekvencí 10 MHz. Komponenta vytváří dvojnásobnou frekvenci z důvodu dvou stavů na jeden odeslaný/přijatý bit. Tato úprava podstatně zjednodušila návrh celého modulu.

3.3 Modul UART komunikace – obvod FPGA

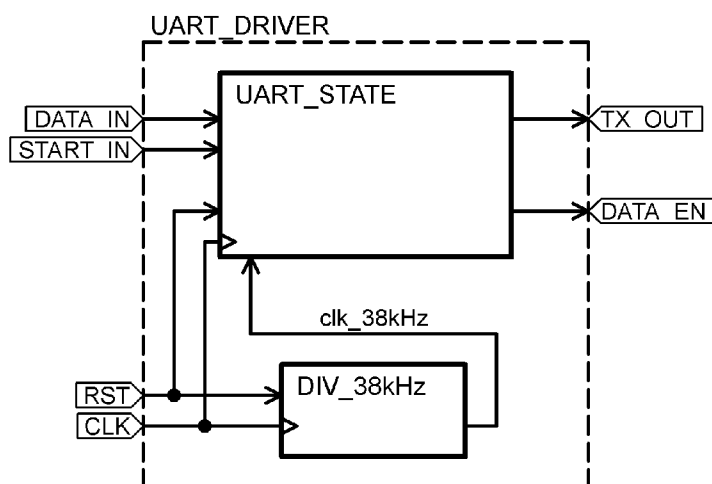
Sériového rozhraní UART se využívá u komunikace mezi FPGA obvodem a Bluetooth modulem. Jedná se o asynchronní komunikaci, a proto je možné signál přenášet jen po jednom vodiči. Protokol rozhraní je znázorněn na obrázku 3-3.



Obrázek 3-3: UART protokol

V klidovém stavu je napěťová úroveň na log. 1 (v tomto případě 3,3 V). Začátek přenosu je proveden snížením napěťové úrovně na log. 0. Jedná se o tzv. start bit. Poté následuje sekvence osmi bitů od LSB do MSB a log. 1 – stop bitem je přenos daného paketu ukončen. V aplikacích s UART komunikací je možné nastavovat i paritní bity pro kontrolu přenosu. Tyto bity jsou zařazeny mezi D7 a STOP BIT.

U prostorového ovladače byla zvolena rychlost přenosu 38 400 bps, což odpovídá rychlosti 38 400 bitů za sekundu. Na tuto rychlost byl nastaven jak přijímací modul, tak odesílací modul v ovladači. Pro realizaci v FPGA obvodu byl zvolen podobný postup jako u SPI komunikace, tedy stavový automat samotného odesílání a podpůrná komponenta pro generování hodinového signálu. Viz obrázek 3-4.



Obrázek 3-4: Schéma modulu UART komunikace

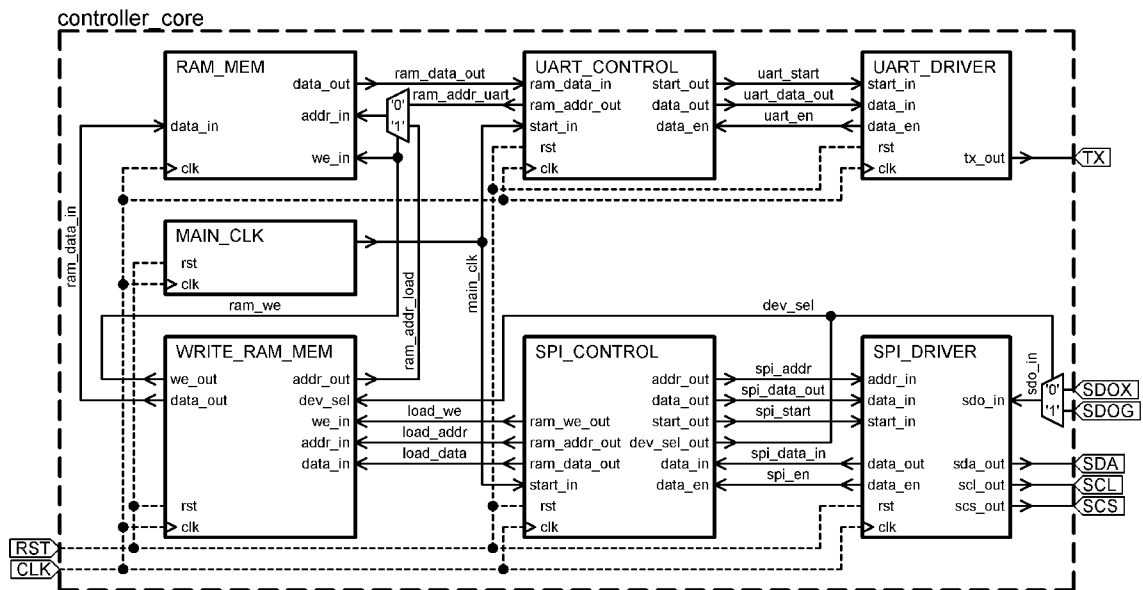
Podpůrná komponenta DIV_38kHz má za úkol generovat hodinový signál s frekvencí 38 400 Hz. Při použití 50 MHz oscilátoru pro generování hlavního řídicího hodinového signálu není možné vytvořit přesný počet period pro vznik této frekvence. Pro generování je využito čítače s koncovou hodnotou 1 302 hodinových cyklů. Při zpětném přepočtu vychází výstupní frekvence komponenty na 38 402,5 Hz, ale vzhledem k synchronizaci před každým odeslaným paketem je tato chyba zanedbatelná.

Hlavní řídicí komponentou je stavový automat s prvním stavem IDLE, který čeká na vstupní signál START. Jestliže se úroveň signálu START dostane na log. 1, následuje stav SYNC, který má za úkol počkat do následujícího hodinového cyklu z děličky. Poté se na výstup přeneše první (start bit) a spustí se sekvence odesílání bitů ve stavu BIT_SEND. Po skončení této sekvence následuje stav ENABLE, který

signalizuje úspěšný přenos paketu a zajistí přesun do počátečního stavu IDLE.

3.4 Vnitřní obvod FPGA popsany ve VHDL jazyce

Zapojení vnitřního obvodu FPGA je rozděleno do sedmi hlavních částí. Řídící obvody pro rozhraní UART a SPI jsou popsány výše. Komponenta MAIN_CLK generuje signál s periodou 100 ms pro odesílání dat po UART sběrnici do Bluetooth modulu a pro získávání dat po SPI sběrnici ze senzoru. Jedná se o jednoduchý čítač řízený hlavním hodinovým signálem CLK s počtem načtení 5 000 000 period signálu.



Obrázek 3-5: Vnitřní obvod FPGA

Komponenta RAM_MEM je zrealizovaná RAM paměť v obvodu. Obsahuje 128 položek, z nichž každá má 8 bitů. V této komponentě jsou uloženy hodnoty ASCII znaků v požadované sekvenci, která je odesílána přes Bluetooth modul do koncového zařízení. Uspořádání jednotlivých znaků je uvedeno níže:

OUT: ACCX ; ACCY ; ACCZ ; GYRX ; GYRY ; GYZ ; MAGX ; MAGY ; MAGZ ; CRLF

- Kde:
- ACCX ... zrychlení v ose X (0000 - FFFF)
 - ACCY ... zrychlení v ose Y (0000 - FFFF)
 - ACCZ ... zrychlení v ose Z (0000 - FFFF)
 - GYRX ... rotace v ose X (0000 - FFFF)
 - GYRY ... rotace v ose Y (0000 - FFFF)
 - GYRZ ... rotace v ose Z (0000 - FFFF)
 - MAGX ... magnetické působení v ose X (0000 - FFFF)
 - MAGY ... magnetické působení v ose Y (0000 - FFFF)
 - MAGZ ... magnetické působení v ose Z (0000 - FFFF)

Příklad odeslané sekvence:

OUT:AAFF;B125;5DF6;E934;FFBB;0023;82DA;E75A;DE44;CRLF

Kde: ACCX = -21761; ACCY = -20187; ACCZ = 24054
GYRX = -5836; GYRY = -69; GYRZ = 35
MAGX = -32038; MAGY = -6310; MAGZ = -8636

Jednotlivé čtyřbytové hodnoty jsou ze senzoru odesílány v 16 bitech a dvojkovém doplňku. Rozsah hodnot je tedy (-32768 - 32767). Akcelerometr je nastaven v rozsahu ± 2 g, gyroskop v rozsahu $\pm 245^\circ/\text{s}$ a magnetometr v rozsahu ± 2 G.

Odesílání jednotlivých znaků zajišťuje blok UART_DRIVER, který je řízen komponentou UART_CONTROL. Jedná se o stavový automat, který v počátečním stavu IDLE čeká na vstupní signál START_IN. V případě, že je tento signál roven log. 1 je následující stav LOAD_DATA, který nastaví adresu do paměti a s dalším hodinovým signálem přejde do stavu START_DATA (zde je na vstupu RAM_DATA_IN požadovaný znak v binárním formátu). Tento stav odešle do bloku UART_DRIVER signál START, který spustí odesílání a následně nastaví automat do stavu SEND_DATA, který čeká na potvrzovací signál o úspěšném odeslání z bloku UART_DRIVER. V případě, že je tento potvrzovací signál roven log.1, inkrementuje se adresa do paměti a celý proces se opakuje do doby, než je adresovací signál roven 51 (počet platných znaků v paměti RAM). V tomto případě se čeká na další signál START_IN.

Nejdůležitějším blokem celého návrhu je SPI_CONTROL. Tento blok je řízen stejným sekundovým signálem jako UART_CONTROL. K získávání a zápisu dat dochází paralelně. Blok řídí přijímací a odesílací modul pro sběrnici SPI. Opět se jedná o stavový automat s prvním stavem IDLE, který čeká právě na signál START_IN.

V případě, že je START_IN roven log.1, následuje několik dvojstavů s názvem SET a GET. SET stav vždy nastaví požadovanou adresu, vstupní data a povolovací signál. GET stav čeká na výstupní data a povolovací signál pro další přenos. Podrobný popis je uveden zde:

```
IDLE,                -- počáteční stav, čeká na start_in = '1'
SET_WHO_AM_I_XM,    -- dotaz na kontrolní registr WHO_AM_I_XM
GET_WHO_AM_I_XM,    -- příjem platných dat z registru WHO_AM_I_XM
SET_WHO_AM_I_G,     -- dotaz na kontrolní registr WHO_AM_I_G
GET_WHO_AM_I_G,     -- příjem platných dat z registru WHO_AM_I_G
SET_ACC_0,          -- nastavení stream módu pro akcelerometr
GET_ACC_0,          -- potvrzení nastavení
SET_MAG_0,          -- nastavení stream módu pro magnetometr
GET_MAG_0,          -- potvrzení nastavení
SET_MAG_1,          -- nastavení stream módu pro magnetometr
GET_MAG_1,          -- potvrzení nastavení
SET_GYR_0,          -- nastavení stream módu pro gyroskop
GET_GYR_0,          -- potvrzení nastavení
```

```

IDLE_GETTING_DATA, -- po proběhnutí inicializační fáze se každá
opakující se sekvence začíná z tohoto stavu
-- poté následuje 24 stavů pro získání dat z registrů
-- vypsány pouze první 4 pro získání dat z akcelerometru v ose X

SET_ACC_X_0      -- nastavení adresy pro akceleraci v ose X (LSB)
GET_ACC_X_0      -- příjem dat a zápis do paměti (LSB)
SET_ACC_X_1      -- nastavení adresy pro akceleraci v ose X (MSB)
GET_ACC_X_1      -- příjem dat a zápis do paměti (MSB)

```

Velmi důležitá je komponenta `WRITE_RAM_MEM`, která na základně výstupních dat z registrů, nastaveného signálu a zvoleného zařízení (signál `DEV_SEL`) zapisuje do RAM paměti přímé hodnoty znaků v ASCII formátu. Tento blok je čistě kombinační a přepočítání z binárních dat na ASCII znaky je zajištěno pomocí dekodéru 1 z 16.

Obvod obsahuje dva multiplexory. Jeden slouží k přepínání mezi vstupními daty z akcelerometru, magnetometru nebo gyroskopu pomocí signálu `DEV_SEL` a druhý nastavuje správnou adresu do RAM paměti na základně povolovacího zapisovacího signálu `RAM_WE`. Tímto je ošetřeno, že se do paměti může v jeden okamžik pouze zapisovat, případně z ní číst.

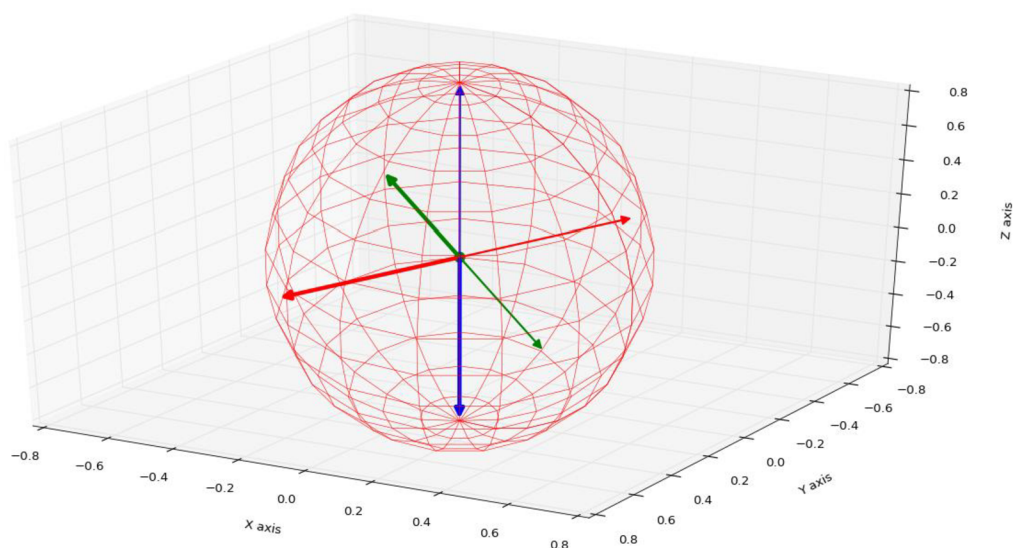
3.5 Vyhodnocení dat z prostorového ovladače

Výstupní data z prostorového ovladače lze přijímat na každém zařízení s USB konektorem a příslušným ovladačem pro převodním USB/UART. Čistá data bez dalších úprav lze zobrazovat v terminálovém okně, ve kterém je nutné nastavit správný komunikační port, rychlost 38 400 bps, 8bitová data a bez parity. Po tomto nastavení, zapnutí ovladače a připojení přijímací podložky do počítače se začnou vypisovat informace v sekvenci popsané výše.

Výstupní data z akcelerometru jsou v jednotce g, tedy absolutního zrychlení vůči Zemi v osách X, Y a Z. Gyroskop předává informace o relativním pohybu ve stupních za sekundu – vzhledem k odesílání každých 100 ms je nutné tuto informaci podělit desíti. Magnetometr udává intenzitu magnetického pole v osách X, Y a Z. Při výpočtech polohy pomocí akcelerometru a gyroskopu zřejmě docházelo k problému se vzorkováním a gyroskop neodesílal platná data. Pro finální určení polohy je tedy využito akcelerometru a magnetometru, jelikož jejich údaje jsou absolutní vzhledem k Zemi. Magnetometr odesílá údaje o aktuálním natočení zařízení vůči magnetickému severu a pomocí akcelerometru se kompenzuje odklon (asi 50°) vůči severu. V případě, že by bylo zařízení používáno na rovníku, nebyla by kompenzace odklonu nutná.

Pro demonstrační účely a vyobrazení pohybu jednotlivých os byl vytvořen program v jazyce Python, který se spustí v příkazovém řádku a zobrazí grafické okno s osami

zařízení - X, Y a Z. Modrá osa znázorňuje pohyb v ose Z, zelená v ose Y a červená v ose X.



Obrázek 3-6: Vykreslení výstupních dat z 3D ovladače

Důležité části programu:

Inicializace sériového portu s číslem 6, s rychlostí 38 400 bps:

```
ser = serial.Serial('COM6', timeout=None, baudrate=38400)
```

Vyčkání na naplnění akumulátoru USB řadiče a následné vyčtení dat:

```
bytesToRead = ser.inWaiting()
if bytesToRead >= 51:
    acc = ser.read(bytesToRead)
```

Program je vybaven autokalibrační funkcí, jelikož rozsah údajů z magnetometru nemá střed v bodě 0. Tato funkce na základě výstupních dat z magnetometru vypočítá střed, maximum a minimum. Například funkce magmax porovnává aktuální hodnotu dat a v případě, že je vyšší než aktuální maximum, nastaví tuto aktuální hodnotu jako maximální hodnotu rozsahu. Obdobně funguje zjištění minimální hodnoty. Výpočet středu se provádí jako součet maxima a minima, podělený dvěma.

```
def magmax(magmax, value):
    if value > magmax:
        magmax = value
    return magmax
```

```
magmaxx = funkce.magmax(magmaxx, magx)
```

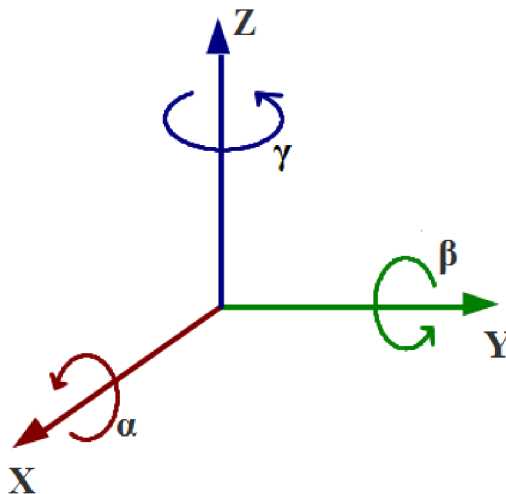
Normalizace jednotlivých údajů (přepočtení na hodnoty -1 / +1)

```

absmagx = ((float(magx-magstrx)/float(magmaxx-magstrx)))
absmagy = -((float(magy-magstry)/float(magmaxy-magstry)))
absmagz = ((float(magz-magstrz)/float(magmaxz-magstrz)))
absaccx = -(float(accx)/16384)
absaccy = (float(accy)/16384)
absaccz = (float(accz)/16384)

```

Aktuální náklon zařízení se dá prezentovat pomocí tří úhlů. V tomto případě: α , β , γ . Úhel α značí otočení kolem osy X, úhel β kolem osy Y a úhel γ kolem osy Z. Tato konvence je velmi často uváděna například v leteckém průmyslu.



Obrázek 3-7: Znáornění úhlů, převzato z: [10]

Výpočet jednotlivých úhlů na základě doporučení z katalogového listu pro implementaci akcelerometricky kompenzovaného magnetického senzoru [11]:

$$\alpha = \arctan2\left(\frac{G_y}{G_z}\right)$$

$$\beta = \arctan\left(\frac{-G_x}{G_y \sin(\alpha) + G_z \cos(\alpha)}\right)$$

$$\gamma = \arctan2\left(\frac{B_z \sin(\alpha) - B_y \cos(\beta)}{B_x \cos(\beta) + B_y \sin(\beta) \sin(\alpha) + B_z \sin(\beta) \cos(\alpha)}\right)$$

Kde: $G_x, G_y, G_z \dots$ normalizované zrychlení

$B_x, B_y, B_z \dots$ normalizované hodnoty magnetického pole

4 ZÁVĚR

V rámci této práce bylo sestaveno zařízení, které je schopné bezdrátově posílat data ze senzoru zrychlení, gyroskopu a magnetometru uvnitř. V úvodní části byly stručně a obecně popsány technologie využitě pro návrh prostorového ovladače, jelikož funkci konkrétního senzoru nelze dohledat. Byly zde také uvedeny nevýhody bezdrátového nabíjení a vzhledem k jeho složité implementaci bylo zvoleno nabíjení drátové.

Jednotlivé komponenty byly zvoleny na základě jejich funkce a dostupnosti. Senzor LSM9DS0 byl vybrán z důvodu obsahu všech tří základních senzorů v prostoru. Problémem tohoto obvodu je jeho nízká citlivost a nutnost kalibrace magnetometru, který nebyl využit. Pouzdro LGA se povedlo zapájet ručně pomocí horkovzdušné pájecí stanice. Výrobce však ruční pájení nedoporučuje, pouzdro je určeno pro pájení přetažením v peci.

Obvod FPGA byl zvolen především kvůli nízké spotřebě a ručně pájitelném pouzdru. Při návrhu bylo využito 25 % náhledových tabulek, 8 % registrů a maximální frekvence obvodu je 160 MHz. Je zde dostatečná rezerva pro vytvoření dalších bloků.

Bluetooth modul HC-05 v průběhu vývoje a testování fungoval bez chyb, vzhledem k jeho malé spotřebě je velmi výhodný pro bateriová zařízení. Jeho velmi jednoduché naprogramování a následné používání z něj činí výborný komunikační prostředek.

Elektroniku zařízení se povedlo zrealizovat menší, než se původně očekávalo. Vzniknul tak prostor k případnému zmenšení obalu pro lepší ergonomii. V případné další verzi by byla odstraněna ostrá hrana na spodní desce ovladače a došlo by k zaoblení pro pohodlnější uchopení zařízení.

Pro demonstraci funkce byl vytvořen program, který zpracovává a interpretuje data získaná ze senzoru. Tato data jsou zobrazena do os X, Y a Z pro názornější prezentaci náklonu a otočení.

Za cenu zvýšení celkové spotřeby zařízení je možné zvýšit přenosovou rychlost, vzorkovací frekvenci a zlepšit tak odezvu zařízení. Tato úprava může mít pozitivní vliv na pohodlí při používání ovladače.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] **Cyberpuck VR Game Controller** [online] 2006, *mindflux.com* [cit. 10-12-2015]
Dostupné z: <http://www.mindflux.com.au/products/iis/cyber.html>
- [2] **Antonín VOJÁČEK - Jak pracují nové 3D MEMS akcelerometry Freescale** [online] 2007, *hw.cz* [cit. 11-12-2015] Dostupné z: <http://vyvoj.hw.cz/soucastky/jak-pracuji-nove-3d-mems-akcelerometry-freescale.html>
- [3] **Antonín VOJÁČEK - Integrované MEMS gyroskopy** [online] 2009, *hw.cz* [cit. 11-12-2015]
Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/integrované-mems-gyroskopy>
- [4] **Maria Teresa TODARO, Leonardo SILEO, Massimo De VITTORIO - Magnetic Field Sensors Based on Microelectromechanical Systems (MEMS) Technology** [online - PDF] *University of Salento, Italy, InTech Europe* [cit. 11-12-2015] Dostupné z: <http://cdn.intechopen.com/pdfs/30946.pdf>
- [5] **Bluetooth definiton** [online] 2016, *techterms.com, Sharpened Productions* [cit. 16-5-2016]
Dostupné z: <http://techterms.com/definition/bluetooth>
- [6] **LSM9DS0 Data sheet** [online - PDF]. Revize 2, 4/2013, *STMicroelectronic* [cit. 3-12-2015] Dostupné z: <http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/datasheet/DM00087365.pdf>
- [7] **MachXO2 Family Data sheet** [online - PDF] Revize 3.2, 5/2016, *Lattice Semiconductor Corp.* [cit. 10-5-2016]
Dostupné z: www.latticesemi.com/~media/LatticeSemi/Documents/DataSheets/MachXO23/MachXO2FamilyDataSheet.pdf
- [8] **Edoardo De MARCHI - Bluetooth HC-05** [online] 2015, *mbed.org* [cit. 9-5-2016]
Dostupné z: <https://developer.mbed.org/users/edodm85/notebook/HC-05-bluetooth/>
- [9] **MCP73831/2 Datasheet** [online - PDF]. Revize G, 2005-2014, *Microchip Technology Inc.* [cit. 21-4-2016]
Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/20001984g.pdf>
- [10] **Osy X,Y,Z - obrázek** [online] *Institutionen för Datavetenskap, Lunds Universitet, LTH* [cit. 27-5-2016]
Dostupné z: http://fileadmin.cs.lth.se/robot/nao/doc/_images/rollPitchYaw.png
- [11] **Talat OZYAGCILAR - Implementing a Tilt-Compensated eCompass using Accelerometer and Magnetometer Sensors** [online - PDF] Revize 4.0, 11/2015, *Freescale Semiconductor, Inc.* [cit. 27-5-2016]
Dostupné z: http://cache.freescale.com/files/sensors/doc/app_note/AN4248.pdf

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

FPGA	F ield P rogrammable G ate A rray
CCCV	C onstant C urrent followed by C onstant V oltage
Wi-Fi	W ireless F idelity
Li-Pol	L ithium P olymerová (baterie)
Li-Ion	L ithium I onová (baterie)
SOT-23	S mall O utline T ransistor
SMD	S urface M ounted D eVICES
LGA	L and G rid A rray
SPI	S erial P eripheral I nterface
USB	U niversal S erial B us
RC	R emote C ontrolled
I²C	I nternal I ntegrated C ircuit (sběrnice)
MEMS	M icro E lectro M echanical S ystem
UART	U niversal / A synchronous R eceiver and T ransmitter
TQFP	T hin F lat Q uad P ack
PLA	P olylactic A cid (typ plastu)

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1-1: Zjednodušený princip kapacitního senzoru	7
Obrázek 1-2: Princip MEMS gyroskopu	8
Obrázek 1-3: Princip drátového nabíjení	10
Obrázek 1-4: Princip bezdrátového nabíjení	10
Obrázek 2-1: Blokové schéma celého systému	11
Obrázek 2-2: Zobrazení funkce jednotlivých senzorů v obvodu, převzato z: [6].....	12
Obrázek 2-3: Bluetooth modul HC-05.....	13
Obrázek 2-4: Akumulátor Li-Pol 850 mAh.....	15
Obrázek 2-5: Grafický návrh celé sestavy 3D ovladače.....	16
Obrázek 2-6: Grafický návrh sestavy	17
Obrázek 2-7: Vrchní obal ovladače	18
Obrázek 2-8: Spodní deska ovladače.....	18
Obrázek 2-9: Horní deska podložky	19
Obrázek 2-10: Spodní deska podložky	19
Obrázek 2-11: Modul s obvodem LSM9DS0	20
Obrázek 2-12: Modul s obvodem FPGA	22
Obrázek 2-13: Deska s Bluetooth modulem HC-05	22
Obrázek 2-14: Napájecí deska ovladače	23
Obrázek 2-15: Deska odkládací a přijímací podložky	24
Obrázek 2-16: Sendvičová struktura ovladače	25
Obrázek 2-17: Vnitřní uspořádání nabíjecí podložky	26
Obrázek 3-1: Protokol SPI obvodu LSM9DS0, převzato z: [6]	29
Obrázek 3-2: Schéma modulu SPI komunikace	30
Obrázek 3-3: UART protokol	31
Obrázek 3-4: Schéma modulu UART komunikace	31
Obrázek 3-5: Vnitřní obvod FPGA.....	32
Obrázek 3-6: Vykreslení výstupních dat z 3D ovladače.....	35
Obrázek 3-7: Znázornění úhlů, převzato z: [10].....	36

SEZNAM TABULEK

Tabulka 2-1: Zapojení jednotlivých pinů obvodu FPGA	21
Tabulka 3-1: Přehled použitých AT příkazů pro modul HC-05	27

SEZNAM PŘÍLOH

A Schémata zařízení

- A.1 Schéma desky se senzorem LSM9DS0
- A.2 Schéma desky s obvodem FPGA
- A.3 Schéma desky s Bluetooth modulem HC-05
- A.4 Schéma napájecí desky ovladače
- A.5 Schéma desky v odkládací podložce

B Desky plošných spojů

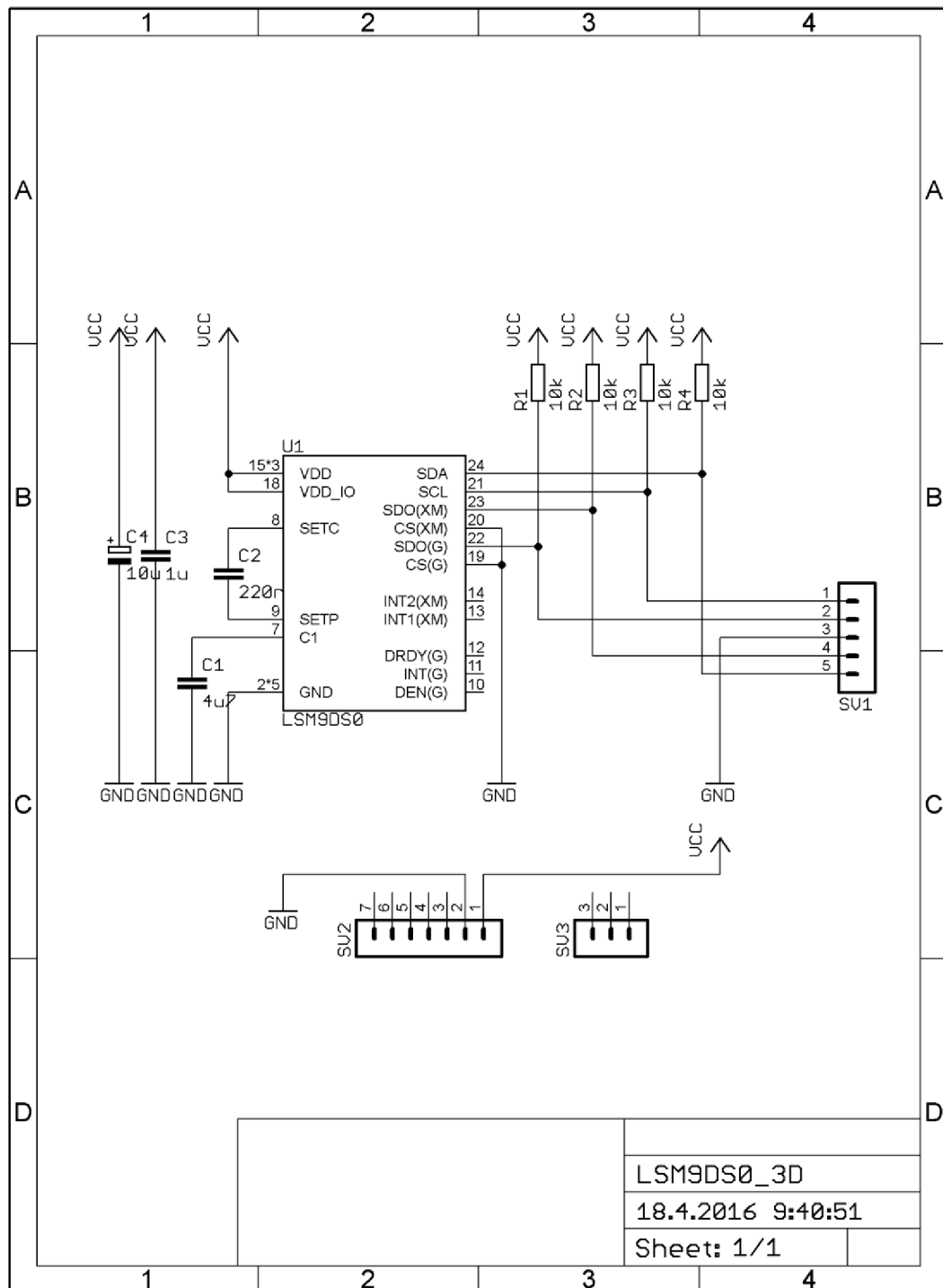
- B.1 DPS se senzorem LSM9DS0
- B.2 DPS s obvodem FPGA
- B.3 DPS s modulem HC-05
- B.4 DPS napájecího modulu
- B.5 DPS odkládací podložky

C Seznamy součástek

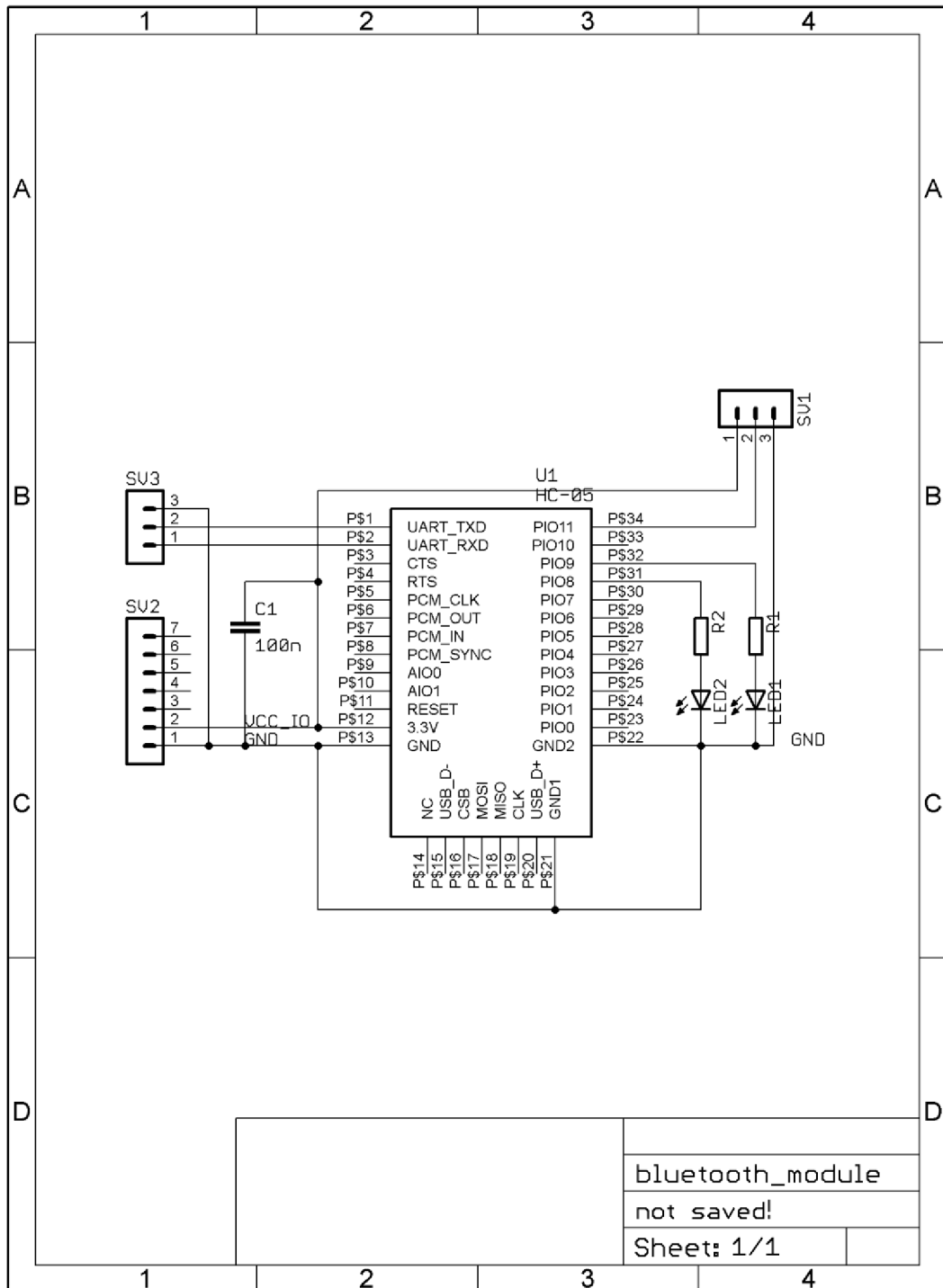
- C.1 Seznam součástek desky se senzorem LSM9DS0
- C.2 Seznam součástek desky s obvodem FPGA
- C.3 Seznam součástek desky s modulem HC-05
- C.4 Seznam součástek napájecí desky ovladače
- C.5 Seznam součástek desky odkládací podložky

A SCHÉMATA ZAŘÍZENÍ

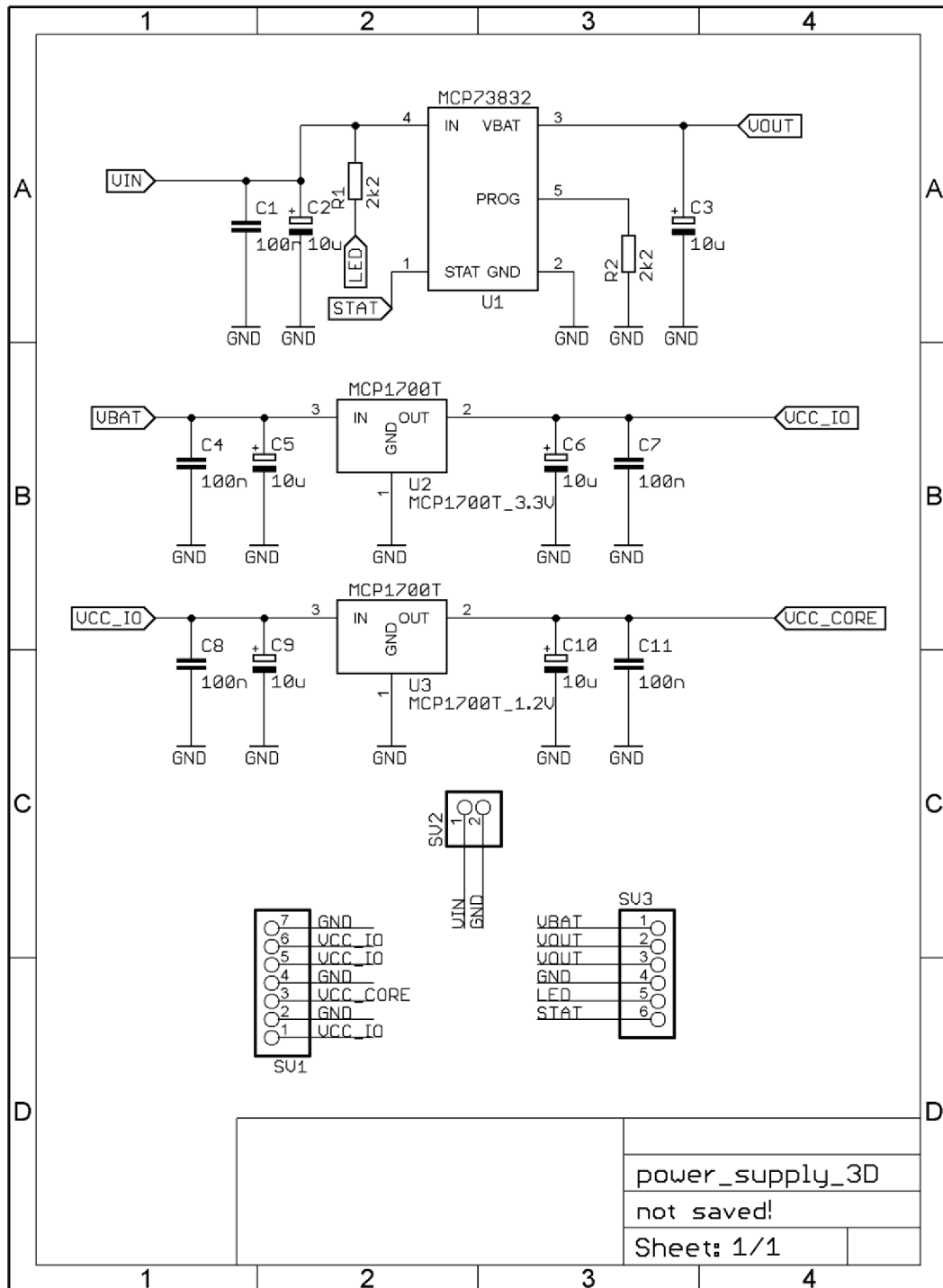
A.1 Schéma desky se senzorem LSM9DS0



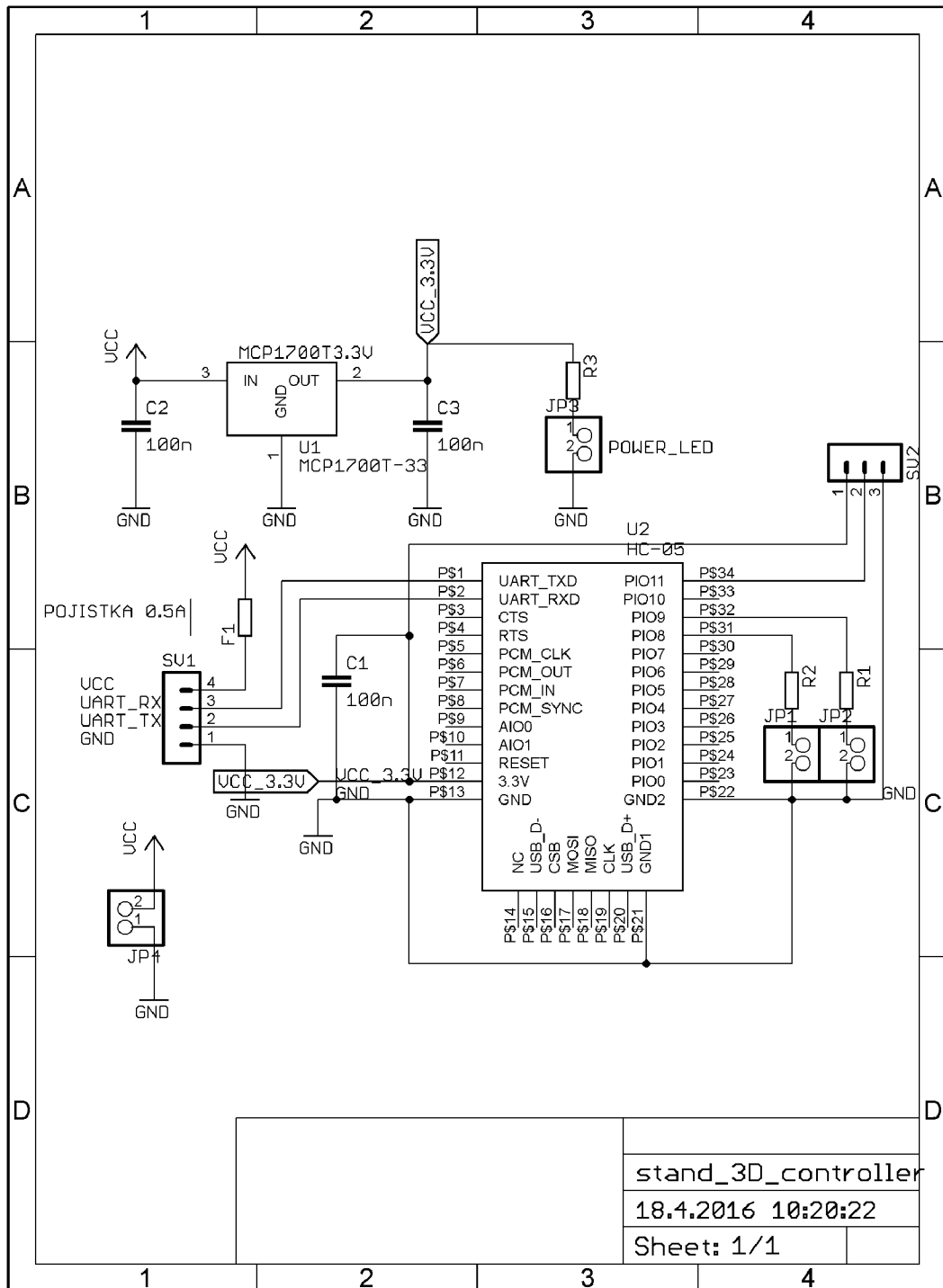
A.3 Schéma desky s Bluetooth modulem HC-05



A.4 Schéma napájecí desky ovladače



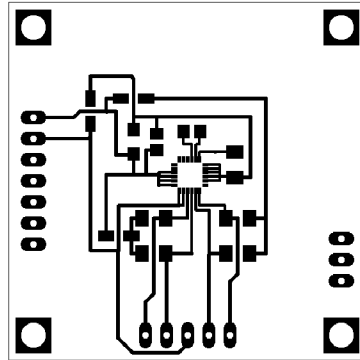
A.5 Schéma desky v odkládací podložce



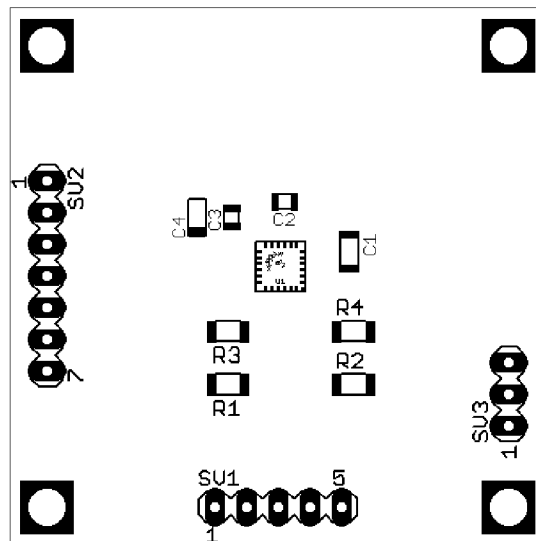
stand_3D_controller
18.4.2016 10:20:22
Sheet: 1/1

B DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ

B.1 DPS se senzorem LSM9DS0

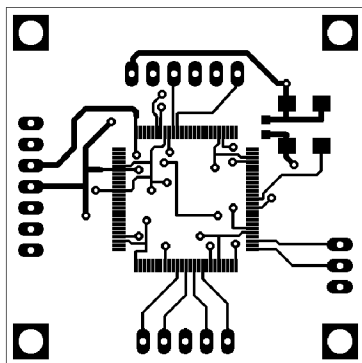


Strana TOP, rozměry 47 x 47 mm, měřítko M1:1

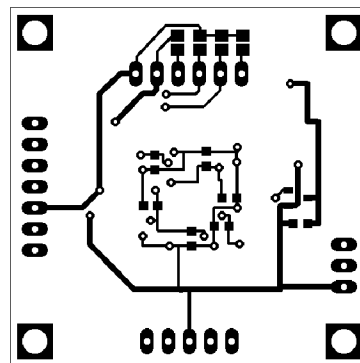


Osazovací plán desky plošného spoje

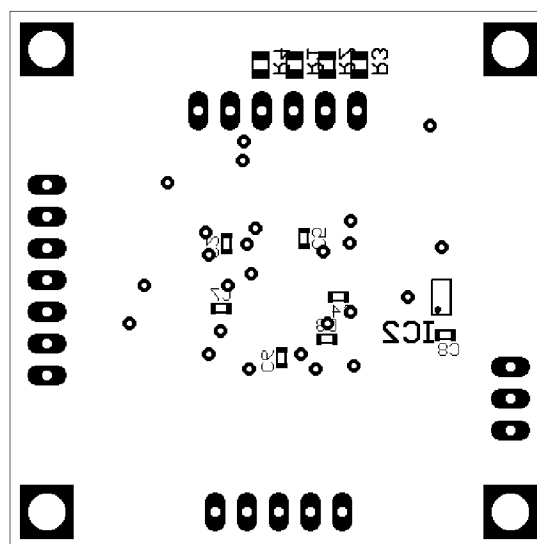
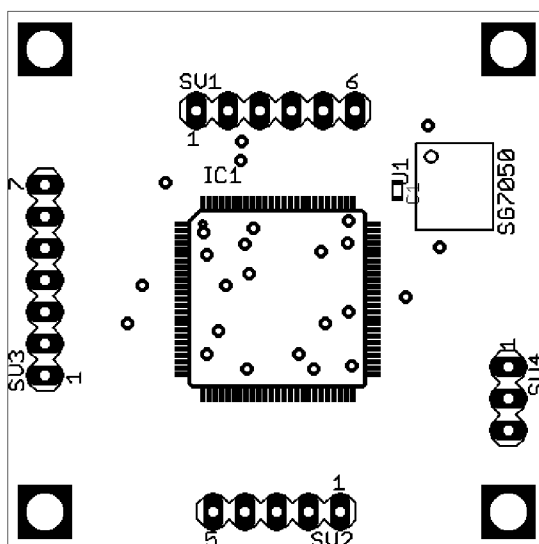
B.2 DPS s obvodem FPGA



Strana TOP, rozměry 47 x 47 mm,
měřítko M1:1

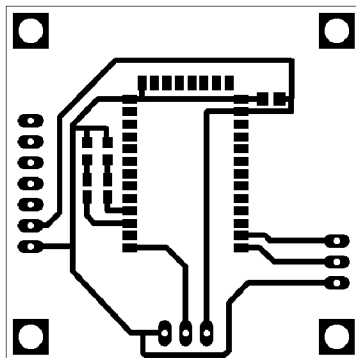


Strana BOTTOM, rozměry 47 x 47 mm,
měřítko M1:1

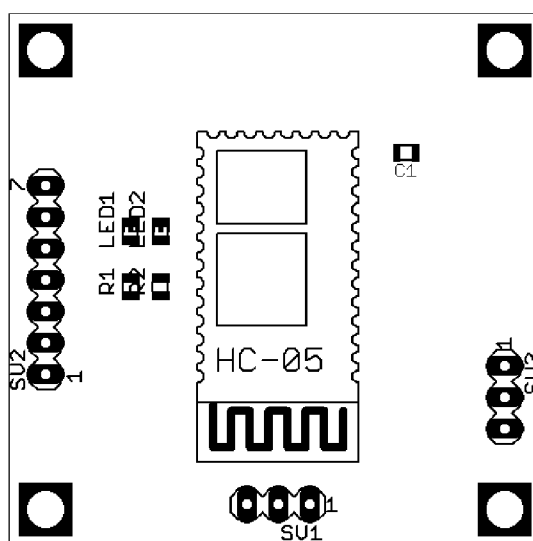


Osazovací plány desek plošných spojů

B.3 DPS s modulem HC-05

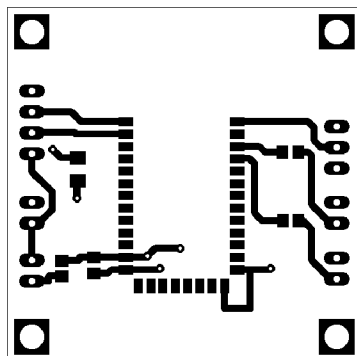


Strana TOP, rozměry 47 x 47 mm, měřítko M1:1

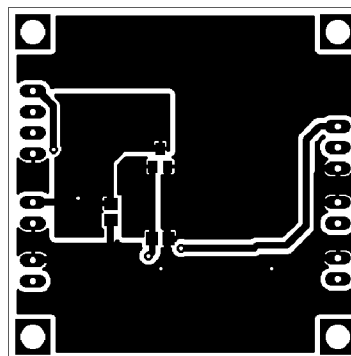


Osazovací plán desky plošného spoje

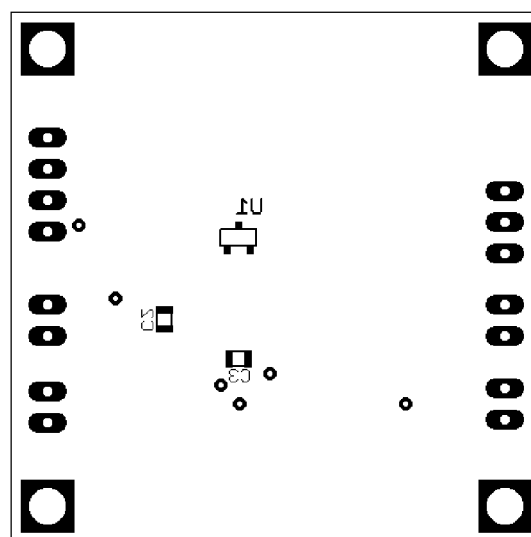
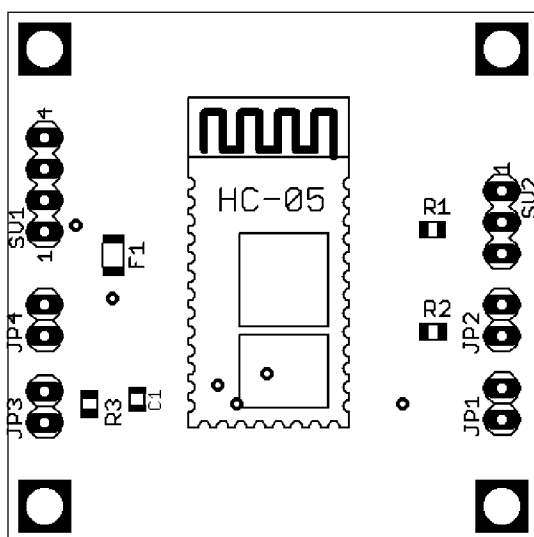
B.5 DPS odkládací podložky



Strana TOP, rozměry 47 x 47 mm,
měřítko M1:1



Strana BOTTOM, rozměry 47 x 47 mm,
měřítko M1:1



Osazovací plány desek plošných spojů

C SEZNAMY SOUČÁSTEK

C.1 Seznam součástek desky se senzorem LSM9DS0

Farnell ID	poč.	Název	Popis
2112859	1	C1	4u7/50V keramika SMD_1206
2496964	1	C2	220nF/50V keramika SMD_0805
1845750	1	C3	1uF/50V keramika SMD_0805
1650980	1	C4	10uF/16V tantal SMD_A
9335765	4	R1,R2,R3,R4	10k rezistor SMD_1206
2433079	1	U1	LSM9DS0

C.2 Seznam součástek desky s obvodem FPGA

Farnell ID	poč.	Název	Popis
2496833	8	C1,C2,C3,C4,C5,C6,C7,C8	100nF/25V keramika SMD_0603
2447672	3	R1,R2,R3	4k7 rezistor SMD_0805
9332812	1	R4	2k2 rezistor SMD_0805
8690421	1	IC2	RST obvod SOT-23
2442968	1	U1	Oscilátor 50 MHz SMD
2252985	1	IC1	FPGA - MACHXO2 – 1200

C.3 Seznam součástek desky s modulem HC-05

Farnell ID	poč.	Název	Popis
2524906	1	C1	100nF/50V keramika SMD_0805
9332812	2	R1,R2	2k2 rezistor SMD_0805
---	1	U1	HC-05 Bluetooth modul
---	2	LED1,LED2	LED informační SMD_1206

C.4 Seznam součástek napájecí desky ovladače

Farnell ID	poč.	Název	Popis
1650980	6	C2,C3,C5,C6,C9,C10	10uF/16V tantal SMD_A
2524906	5	C1,C4,C7,C8,C11	100nF/50V keramika SMD_0805
9332812	2	R1,R2	2k2 rezistor SMD_0805
1332159	1	U1	MCP73832T-2ACI/OT
1296592	1	U2	MCP1700T-3302E/TT
1851940	1	U3	MCP1700T-1202E/TT
---	1		BATERIE LI-POL
---	1	LED1	1x LED informační

C.5 Seznam součástek desky odkládací podložky

Farnell ID	poč.	Název	Popis
2524906	3	C1,C2,C3	100nF/50V keramika SMD_0805
9332812	3	R1,R2,R3	2k2 rezistor SMD_0805
9921834	1	F1	pojistka 0,5 A SMD_1206
1296592	1	U1	MCP1700T-3302E/TT
---	1	U2	HC-05 Bluetooth modul
---	2	LED1,LED2	2x LED informační