

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

CZECH TECHNICAL UNIVERSITY IN PRAGUE

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA MĚŘENÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING
DEPARTMENT OF MEASUREMENT

MNOHOKANÁLOVÝ SYSTÉM PRO MONITOROVÁNÍ POHYBU
SE SENZORY MEMS

MULTICHANNEL SYSTEM FOR MOVEMENT MONITORING USING MEMS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JAN MUCALA

PRAHA 2015



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE

CZECH TECHNICAL UNIVERSITY IN PRAGUE

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA MĚŘENÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING
DEPARTMENT OF MEASUREMENT

MNOHOKANÁLOVÝ SYSTÉM PRO MONITOROVÁNÍ POHYBU
SE SENZORY MEMS

MULTICHANNEL SYSTEM FOR MOVEMENT MONITORING USING MEMS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JAN MUCALA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. JAN FISCHER, CSc.

PRAHA 2015



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Jan Mucala**

Studijní program: **Kybernetika a robotika**
Obor: **Senzory a přístrojová technika**

Název tématu česky: **Mnohokanálový systém pro monitorování pohybu se senzory MEMS**

Název tématu anglicky: **Multichannel System for Movement Monitoring Using MEMS**

Pokyny pro vypracování:

Navrhněte a realizujte bloky systému pro mnohokanálové monitorování pohybu objektu s využitím senzorů MEMS, např. MPU-9150. Jednotlivé moduly budou obsahovat řídicí procesory, např. řady STM32L0x, ke kterým budou připojeny vždy dva senzory MEMS. Navrhněte a ověřte způsob přenosu dat z jednotlivých modulů prostřednictvím sériové sběrnice do řídicí jednotky, která bude získaná data předávat dále prostřednictvím rozhraní WiFi. Vytvořte potřebné programové vybavení pro jednotlivé moduly, řídicí jednotku i nadřazený počítač.

Seznam odborné literatury:

- [1] Yiu, J.: The Definitive Guide to the ARM Cortex-M0
- [2] RM0091 Reference Manual, STMicroelectronics, 2014, www.st.com
- [3] Novotný, P.: Diplomová práce, ČVUT - FEL, 2013

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Jan Fischer, CSc.

Datum zadání bakalářské práce: 27. listopadu 2014

Platnost zadání do¹: 31. srpna 2016

L. S.

Doc. Ing. Jan Holub, Ph.D.
vedoucí katedry

Prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 27. 11. 2014

ABSTRAKT

Cílem práce bylo navrhnout a realizovat systém sběru dat pro mnohokanálové monitorování pohybu objektu. Systém obsahuje inerciální měřící jednotky osazené mikrokontrolérem ARM o jádru Cortex-M0 a MEMS senzorem MPU-9150, ze kterého jsou data vyčítána za pomoci I2C rozhraní a poté dále posílána po CAN sběrnici centrálnímu uzlu. Sériové rozhraní USART je použito ke komunikaci centrální jednotky s Wi-Fi modulem, který následně zajišťuje bezdrátový přenos dat do PC. Součástí práce bylo taktéž vytvořit potřebné softwarové vybavení navržených modulů i nadřazeného počítače.

KLÍČOVÁ SLOVA

ARM; Cortex-M0; STM32; MEMS; IMU; CAN; I2C; USART; Wi-Fi

ABSTRACT

The main goal of this thesis were to design and implement the multichannel data acquisition system for motion capture. The system includes inertial measurement units equipped by microcontroller ARM of Cortex-M0 core and is also equipped by MEMS sensor MPU-9150 which the data are read from using I2C interface and then transmitted through CAN bus to central unit. The serial interface USART provides communication between central unit and Wi-Fi module that ensures the data transmission to PC is carried out. The realization of software equipment for designed modules and PC is also part of the project.

KEYWORDS

ARM; Cortex-M0; STM32; MEMS; IMU; CAN; I2C; USART; Wi-Fi

MUCALA, Jan *Systém sběru dat pro mnohokanálové monitorování pohybu objektu*: bakalářská práce. Místo: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra měření, 2015. 79 s. Vedoucí práce byl doc. Ing. Jan Fischer, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Systém sběru dat pro mnohokanálové monitorování pohybu objektu“ 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 autorského 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.

Místo

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu práce panu doc. Ing. Janu Fischerovi, CSc. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Místo

.....

(podpis autora)

OBSAH

1	Úvod	11
1.1	Úvod do problematiky	11
1.2	Cíl projektu	12
2	Rozbor problematiky	13
2.1	Současné technologie měření pohybu	13
2.2	Koncepce systému	14
2.2.1	Základní koncepce celého systému	14
2.2.2	Základní koncepce inerciální měřicí jednotky IMU	15
2.2.3	Koncepce centrální jednotky	17
2.3	Použité integrované obvody	17
2.3.1	Mikroprocesor STM32F0xx	17
2.3.2	MEMS senzor MPU-9150	19
2.3.3	Napěťový regulátor ADP3301 a LF33CDT	22
2.3.4	CAN budič SN65HVD231Q	22
2.4	Použité komunikační protokoly	23
2.4.1	Komunikační protokol CAN	23
2.4.2	Sériová sběrnice I2C	29
2.4.3	Další použitá komunikační rozhraní	30
2.5	Realizace komunikace	30
2.5.1	Základní komunikace mezi moduly	30
2.5.2	Optimalizace a frekvenční nastavení MCU a MEMS	33
2.5.3	Konfigurace přenosové rychlosti CAN	35
2.5.4	Bezdrátový přenos dat do PC	37
3	Návrh a realizace měřících modulů	38
3.1	Popis zapojení modulu Final	38
3.1.1	Zapojení napěťového regulátoru ADP3301	38
3.1.2	Napájení MCU	39
3.1.3	Zapojení a vyvedení pinů MCU	40
3.1.4	Zapojení MEMS senzorů	43
3.1.5	Zapojení budiče CAN	44
3.2	Popis zapojení testovacího modulu Test1	45
3.2.1	Zapojení napěťového regulátoru LF33CDT	46
3.2.2	Zapojení USB konektoru a přepínače	46
3.3	Zapojení testovacího modulu Test2	47
3.4	Desky plošných spojů	47

3.4.1	DPS modulu Final	48
3.4.2	DPS testovacího modulu Test1	51
3.4.3	DPS testovacího modulu Test2	52
4	Software	53
4.1	Vývojové prostředí μ Vision5 a firmware	53
4.2	PC aplikace	53
5	Naměřené hodnoty senzorů	55
6	Závěr	58
	Literatura	60
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	62
	Seznam příloh	64
A	Výrobní podklady DPS Final	65
A.1	Návrh DPS Final	65
A.2	Osazovací plán DPS Final	65
A.3	Fotky vyrobené DPS Final	66
A.4	Schéma zapojení DPS Final	66
A.5	Seznam součástek DPS Final	68
B	Výrobní podklady DPS Test1	70
B.1	Návrh DPS Test1	70
B.2	Osazovací plán DPS Test1	70
B.3	Fotky vyrobené DPS Test1	71
B.4	Schéma zapojení DPS Test1	71
B.5	Seznam součástek DPS Test1	73
C	Výrobní podklady DPS Test2	75
C.1	Návrh DPS Test2	75
C.2	Osazovací plán DPS Test2	75
C.3	Fotky vyrobené DPS Test2	76
C.4	Schéma zapojení DPS Test2	76
C.5	Seznam součástek DPS Test2	78
D	Obsah přiloženého CD	79

SEZNAM OBRÁZKŮ

2.1	Kompletní blokové schéma systému	14
2.2	Monitorované části lidského těla	15
2.3	Koncepce IMU modulu	16
2.4	Znázornění vzájemné polohy obou MEMS senzorů na DPS	17
2.5	Blokové schéma mikrořadiče STM32F042K6T6	18
2.6	Graf velikostí Flash paměti mikroprocesorové řady STM32F0x2	19
2.7	Částečné blokové schéma zapojení MEMS senzoru MPU-9150	21
2.8	Implementace jednotky se sběrnici CAN	25
2.9	Úrovně elektrických signálů sběrnice CAN	25
2.10	Průběh arbitráže přístupu více uzlů ke sběrnici CAN	26
2.11	Struktura datového rámce protokolu CAN	26
2.12	Nominální délka bitu a její závislost na frekvenční konfiguraci systému	29
2.13	Fyzická realizace sběrnice I2C	30
2.14	Základní princip dotazování centrálního uzlu jednotek IMU	32
2.15	Schématické zobrazení konfigurace systémových hodin	33
3.1	Schématický návrh zapojení regulace napájení	39
3.2	Schéma zapojení blokování napájení MCU	39
3.3	Zapojení levé části schématu MCU	40
3.4	Doporučené zapojení NRST spolu s vnitřním zapojením	41
3.5	Zapojení pravé části schématu MCU	42
3.6	Schéma zapojení senzorů MEMS	44
3.7	Schéma zapojení budiče CAN	45
3.8	Schéma zapojení napěťového regulátoru LF33CDT	46
3.9	Připojení přepínače k MCU	46
3.10	Zapojení USB-Mini konektoru	47
3.11	Výsledná realizace DPS Final	48
3.12	Vrchní vrstva DPS Final	49
3.13	Spodní vrstva DPS Final	49
3.14	Vrchní vrstva DPS Final	49
3.15	Spodní vrstva DPS Final	49
3.16	Osazovací plán horní vrstvy DPS Final	50
3.17	Osazovací plán spodní vrstvy DPS Final	50
3.18	Výsledná realizace DPS Test1	51
3.19	Osazovací plán horní vrstvy DPS Test1	51
3.20	Vrchní vrstva DPS Test1	52
3.21	Spodní vrstva DPS Test1	52
4.1	PC aplikace	54

4.2	Vyskakovací okno pro konfiguraci rozsahů senzorů	54
5.1	Graf naměřených dat osy akcelerometru při testovacím pohybu . . .	56
A.1	Vrstva TOP DPS Final (2,33:1)	65
A.2	Vrstva BOT DPS Final (2,33:1)	65
A.3	Osazovací plán vrstvy TOP DPS Final	65
A.4	Osazovací plán vrstvy BOT DPS Final	65
A.5	Vyrobená DPS Final TOP	66
A.6	Vyrobená DPS Final BOT	66
B.1	Vrstva TOP DPS Test1 (1,35:1)	70
B.2	Vrstva BOT DPS Test1 (1,35:1)	70
B.3	Osazovací plán vrstvy TOP DPS Test1	70
B.4	Vyrobená DPS Test1	71
B.5	Osazená DPS Test1	71
C.1	Návrh DPS Test2	75
C.2	Horní vrstva DPS Test2 (2,77:1)	75
C.3	Spodní vrstva DPS Test2 (2,77:1)	75
C.4	Osazovací plán vrstvy TOP DPS Test2	75
C.5	Vyrobená DPS Test2	76
C.6	Osazená DPS Test2	76

SEZNAM TABULEK

2.1	Porovnání rozhodujících parametrů při výběru budiče sběrnice CAN .	23
2.2	Závislost rychlosti přenosu na délce sběrnice	28
3.1	Rozmístění pinů konektorů J1 a J2 na DPS Test1	52
5.1	Naměřené hodnoty offsetů senzorů	55
5.2	Naměřené hodnoty hladiny šumu akcelerometru	55
5.3	Naměřené hodnoty hladiny šumu gyroskopu	55
5.4	Naměřené hodnoty hladiny šumu magnetometru	56
5.5	Hodnoty osy akcelerometru naměřené rychlým pohybem z bodu A do bodu B a zpět	57

1 ÚVOD

1.1 Úvod do problematiky

Senzory pro monitorování či detekci pohybu jsou dnes velmi rozšířenou součástí všech možných zařízení od chytrých mobilů, tabletů, notebooků, navigačních systémů až po automobilový průmysl, ve kterém jsou např. použity k detekci příliš velkého záporného zrychlení a signalizaci příznaku řídicí jednotce, aby spustila air-bag. Laptopy je zase využívají k ochraně pevného disku v případě pádu a tak jsou v každodenním životě velmi užitečné.

Tyto senzory se nazývají MEMS (MEMS senzor – Micro-Electro-Mechanical Systems) a fakticky obsahují dva nebo tři senzory: gyroskop, akcelerometr a někdy elektronický magnetometr. Společné zpracování a vyhodnocení změřených dat všech tří senzorů nabízí poměrně přesné určení polohy zařízení v reálném čase. S využitím více těchto senzorů lze pak monitorovat velmi rychle a detailně i pohyb částí objektu, které se nepohybují stejnosměrně konstantní rychlostí, jako je tomu u člověka. Přijatá data pak mohou být např. rekonstruována do 3D modelu.

Monitorování pohybu¹ člověka je dnes rychle se rozvíjející a velmi využívanou technologií v mnoha profesních odvětvích. Jednou z nich je třeba medicína, která využívá rekonstrukci pohybu člověka k identifikaci různých onemocnění pacienta. Například kulhání dítěte může značit svalovou dystrofií či obrnu [22]. V herním a filmovém průmyslu se snímání pohybu prosazuje při tvorbě animace autentických pohybů bytostí v případech, kdy jsou scény nerealizovatelné či příliš nebezpečné. V neposlední řadě je třeba zmínit i vojenský, reklamní průmysl a sportovní odvětví.

Systémy sběru dat k měření pohybu mohou fungovat na principu dvou koncepcí. Jednou z nich je koncepce centralizovaného systému, kde veškerou komunikaci a řízení obstarává centrální uzel v pozici řídicí jednotky, ke které jsou připojeny senzory nebo akční členy obsluhující dané procesy. Rozšířenějším typem koncepce je dnes distribuovaný systém, který obsahuje autonomní moduly, které k výkonu svého procesu nevyžadují zásah řídicí jednotky. To zvyšuje spolehlivost systému, jsou však kladeny vyšší nároky na komunikační rozhraní a softwarové vybavení jednotlivých akčních členů.

V aplikacích se všemi měřícími jednotkami stejného charakteru se vyplatí použít

¹V anglické literatuře označováno jako motion capture.

centralizovaný typ řízení. Pro takovéto systémy je dnes k dispozici nepřeberné množství datových sběrnic a komunikačních rozhraní jako jsou SPI, Profibus, Interbus, Ethernet, CANopen a CAN, který je hojně využíván v automobilovém průmyslu ke komunikaci řídicích jednotek. Všechna zmíněná komunikační rozhraní poskytují postačující rychlost ke snímání i velmi rychlých pohybů a mohou tak být použity například ve vrcholovém sportu.

1.2 Cíl projektu

Prvotním záměrem využití systému bylo ve sportovním odvětví k monitorování pohybu, možnosti určení aktivity hráče v utkání či na tréninku a rekonstrukci pohybů pro zlepšování techniky a koordinace sportovce. Výsledný systém by však mohl být použit i v dalších profesních odvětvích zmíněných v 1.1. Tato práce pak může posloužit ke studijním účelům nebo k další nástavbě.

Cílem práce je realizace všech potřebných modulů systému o malých rozměrech. Tyto moduly by měly být osazeny mikrokontroléry s jádrem ARM o nízkém odběru a MEMS senzory s dostatečným rozlišením a přesností. Měly by poskytovat komunikační rozhraní o postačující rychlosti, kterým by s centrální jednotkou komunikovaly.

Důležitým požadavkem na senzory MEMS je přesnost a četnost naměřených dat. Dále pak je vítána nízká latence systému i když není klíčová, jelikož ani není záměrem přijímaná data rekonstruovat v reálném čase.

Systém by měl být schopen bezdrátového přenosu dat do PC za pomoci některého ze dvou základních komunikačních protokolů UDP nebo TCP. Přijatá data by mělo být možno exportovat do souboru. Data exportovaná PC aplikací musí být opatřena časovou značkou jejich příjmu a nastaveným rozsahem senzorů, aby mohla být data správně rekonstruována.

Významným požadavkem systému je jeho nízký proudový odběr, aby snímání mohlo probíhat co nejdéle. Napájení bude provedeno akumulátory jedním ze dvou způsobů: globálně či lokálně.

2 ROZBOR PROBLEMATIKY

V prvních fázích realizace mnohokanálového měřicího systému je často zapotřebí ověřit funkčnost navržených obvodů před samotnou hromadnou výrobou. Tímto přístupem lze zabránit vzniku případných chyb v návrhu a snížit tak náklady na výrobu. Z tohoto důvodu byl pro zkušební účely navržen testovací¹ modul, ve kterém byly vyvedeny všechny piny mikroprocesoru a využito více komunikačních rozhraní pro nahrávání firmwaru do vnitřní paměti Flash. Testovacímu plošnému spoji je proto také vyhrazena část této práce. Většina vývoje softwaru probíhala na tomto testovacím modulu a STM32F072-Discovery kitu, který posloužil jako centrální jednotka. Wi-Fi modul pro bezdrátovou komunikaci po Wi-Fi síti byl zapůjčen z laboratoře ČVUT.

2.1 Současné technologie měření pohybu

V dnešní době se lze setkat s různými systémy monitorování pohybu objektu. Jedním z nich je např. optický systém založen na principu snímání kamer.

Několik kamer je uspořádáno z různých úhlů okolo prostoru, ve kterém se daný objekt pohybuje [23]. Tyto kamery musí být staticky upevněny a při jakémkoli jejich pohybu musí být znovu zkalibrovány. Každá kamera vyfotí snímek, ve kterém jsou určeny sledované body (světelné značky). Společně se znalostí polohy kamer lze pak identifikovat polohu bodu v trojrozměrných souřadnicích. Kamery musejí být synchronizovány s vysokou přesností jinak by docházelo k výraznému odchýlení naměřených dat od skutečných. Nevýhodou je fakt, že k realizaci tohoto systému je třeba drahé vybavení a je vyžadován značný post-processing. Výhodou je, že provedení není omežováno kabeláží a data získaná optickým systémem jsou povětšinou velmi přesná [24].

Dříve byly také vyvíjeny tzv. exoskeletony, které jsou tvořeny pevnou konstrukcí na těle osoby [24]. Orientace částí těla byla získávána z úhlů mezi jednotlivými částmi konstrukce. V současnosti jsou však tyto systémy na ústupu, jelikož pro reálnou aplikaci nejsou příliš praktické.

Dnes jsou velmi rozšířené systémy inerční zahrnující typicky dva typy senzorů, jimiž jsou tří-osé akcelerometry a gyroskopy a v některých případech také magnetometry. Gyroskopy snímají změnu úhlové rychlosti zatímco akcelerometry zazna-

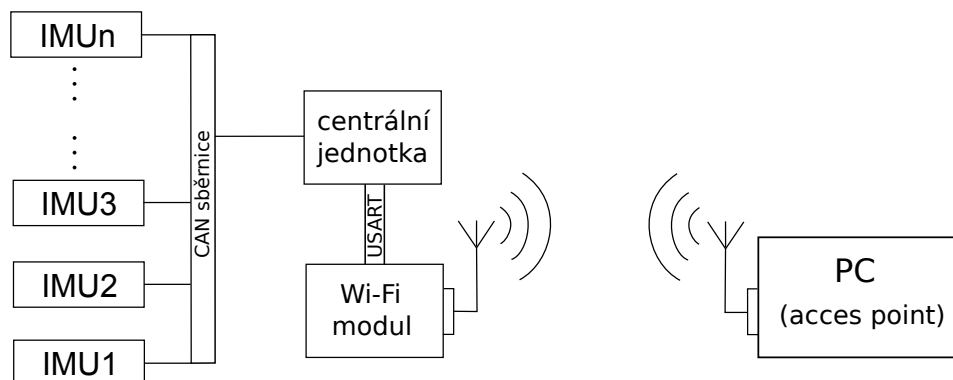
¹V této práci vždy označovaný jako testovací či zkušební modul

menávají zrychlení. Protože snímají okamžitou změnu pohybu, je třeba na počátku měření znát jejich souřadnice. Takovéto systémy přináší výhodu nezávislosti na okolním prostředí např. oproti optickým systémům a disponují velmi nízkou latencí a vysokou vzorkovací frekvencí. Nevýhodou je, že se zvyšující se dobou snímání pohybu dochází k akumulaci chyb.

2.2 Koncepce systému

2.2.1 Základní koncepce celého systému

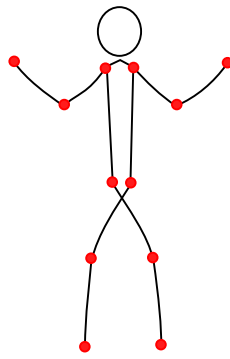
Základním stavebním kamenem systému je měřící jednotka IMU (inerciální měřící jednotka – Inercial Measurement Unit)(bližší popsána v 2.2.2), která obsahuje MEMS senzor (gyroskop, akcelerometr, elektronický magnetometr) a posílá naměřená data od všech tří senzorů po CAN sběrnici centrálnímu modulu. Po rozhraní USART pak centrální uzel přeposílá data Wi-Fi modulu, který zajišťuje bezdrátovou komunikaci s nadřazeným PC po Wi-Fi síti. Nadřazené PC tvoří AP (přístupový bod – Access Point), ke kterému se Wi-Fi modul připojuje. Blokové schéma celého systému je zachyceno na obr. 2.1.



Obr. 2.1: Kompletní blokové schéma systému

K demonstraci základního monitorování pohybu částí těla postačí 12 modulů, pro každou následně vyjmenovanou část těla 2 moduly - zápěstí, loket, rameno, kotník, koleno, bok (viz. obr. 2.2). Pro účely demonstrace funkce systému však finálně bylo vyrobeno a zprovozněno 8 měřících jednotek spolu s jednou centrální. Důvodem byla nižší cena².

²Výroba se účtuje za 1 dm^2 . Panelizace devíti modulů o velikosti přibližně 3x3 cm nepřekročí velikost 1 dm^2 .



Obr. 2.2: Monitorované části lidského těla

Napájení celého systému bude řešeno globálně³ sériovým řazením třech tužkových baterií o 1.5V (4.5V celkem), proto je kladen důraz na nízký proudový odběr. Zároveň však pro širší možnost využití⁴ je potřeba vysoká výkonnost a tak se vyžaduje i výkonová optimalizace. Dalším důležitým faktorem ovlivňující celý systém je požadavek na snížení velikosti jednotlivých modulů. Systém by měl být pro osobu dostatečně komfortní, neomezující v pohybu.

Myšlenkou návrhu byla také možnost částečné obsluhy systému PC aplikací v nadřazeném počítači. Tedy např. možnost nastavení rozsahů senzorů, možnost částečné kalibrace, vypnutí druhého senzoru pro snížení proudového odběru systému a finálně také exportu vyčtených dat do souboru. Více informací v sekci 4.2.

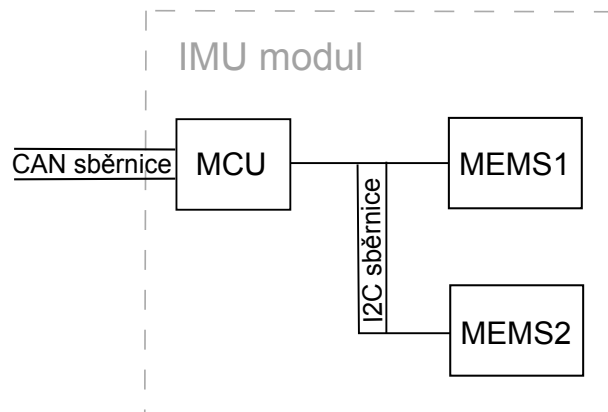
2.2.2 Základní koncepce inerciální měřící jednotky IMU

IMU (inerciální měřící jednotka – Inercial Measurement Unit) je základní měřící entitou systému. Úkolem IMU je změřit data s jejich následným přeposláním centrálnímu uzlu. Samotné měření mají na starost senzory MEMS (MEMS senzor – Micro-Electro-Mechanical Systems), které obsahují tři senzory: akcelerometr, gyroskop a elektronický magnetometr. Akcelerometr je použit pro snímání zrychlení, gyroskop ke snímání rychlosti otáčení a magnetometr taktéž ke snímání otáčení jako reference gyroskopu.

IMU modul obsahuje MCU (mikroprocesor – Microcontroller Unit) potřebný pro obsluhu periférií a dva MEMS měřící požadované fyzikální veličiny. Komunikace MCU se senzory probíhá za pomoci I2C (I2C sběrnice – Inter-Integrated Circuit).

³Ke každé měřící jednotce musí být přivedeny kabely napájení od centrálního zdroje.

⁴Ve sportovních odvětvích je třeba přenášet větší datový objem.



Obr. 2.3: Koncepce IMU modulu

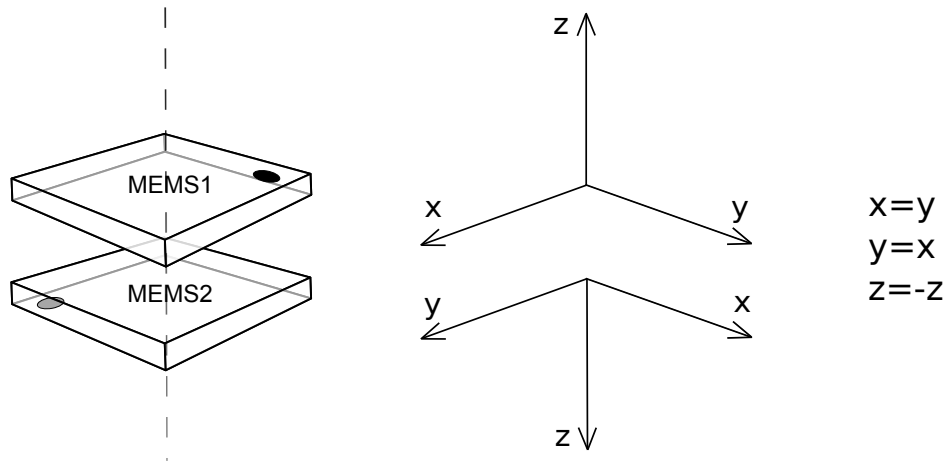
Protože pro komunikaci centrálního uzlu s IMU jednotkami byla vybrána sběrnice CAN, je zapotřebí zahrnout mikroprocesor do každé IMU. Mikroprocesor slouží k výčtu dat z MEMS senzorů za pomoci I2C a taktéž k obsluze periférií. Tyto MEMS senzory obvykle poskytují komunikační rozhraní I2C a pouze v některých případech i SPI. Mohla by tedy vyvstat otázka, proč nepropojit všechny MEMS senzory s centrálním uzlem za pomoci tohoto rozhraní I2C. Jedním z důvodů, proč tak neučinit je, že I2C standardně nabízí max. rychlost přenosu dat jen 400 kHz, druhým pak je, že adresu MEMS senzoru od jedné firmy lze typicky měnit jen v rozsahu dvou až čtyř adres a tak by v případě využití několika desítek senzorů nešlo rozeznat odesílatele a docházelo by k destrukci zpráv na sběrnici.

Důvodem použití dvou MEMS senzorů je zvýšená odolnost vůči elektromagnetickému rušení. Osazení čipů je navrženo ze dvou stran DPS (Deska Plošného Spoje). První sensor je osazen na straně jedné, zatímco druhý obývá stranu druhou - otočen o 180° dle osy $x = y^5$ vůči prvnímu. Data přijatá z obou senzorů jsou následně průměrována dle vzorce

$$\frac{\text{data MEMS1} + \text{data MEMS2}}{2} \quad (2.1)$$

Takovéto osazení však přetáčí osy objektu a je třeba je přepočítat na soustavu souřadnic objektu referenčního. Následující obrázek ilustruje tuto situaci.

⁵Osa úhlu xy .



Obr. 2.4: Znázornění vzájemné polohy obou MEMS senzorů na DPS

2.2.3 Koncepce centrální jednotky

Ke zjednodušení návrhu a snížení nákladů na výrobu je jako centrální jednotka použit totožný modul, jako je použit pro měřicí jednotky IMU. Centrální modul však nebude zcela osazen, zbudou volná místa na pozicích MEMS senzorů a jejich dalších prvků.

V prvních fázích vývoje byl jako centrální jednotka použit STM32F072-Discovery kit⁶ od firmy ST, který poskytuje možnost využití obou komunikačních rozhraní USB a CAN zároveň. Lze ho tedy na rozdíl od mikrokontroléru STM32F042 použít jako testovací kit pro přímý přístup ke sběrnici CAN s výpisem naměřených hodnot přes virtual COM port na PC terminál.

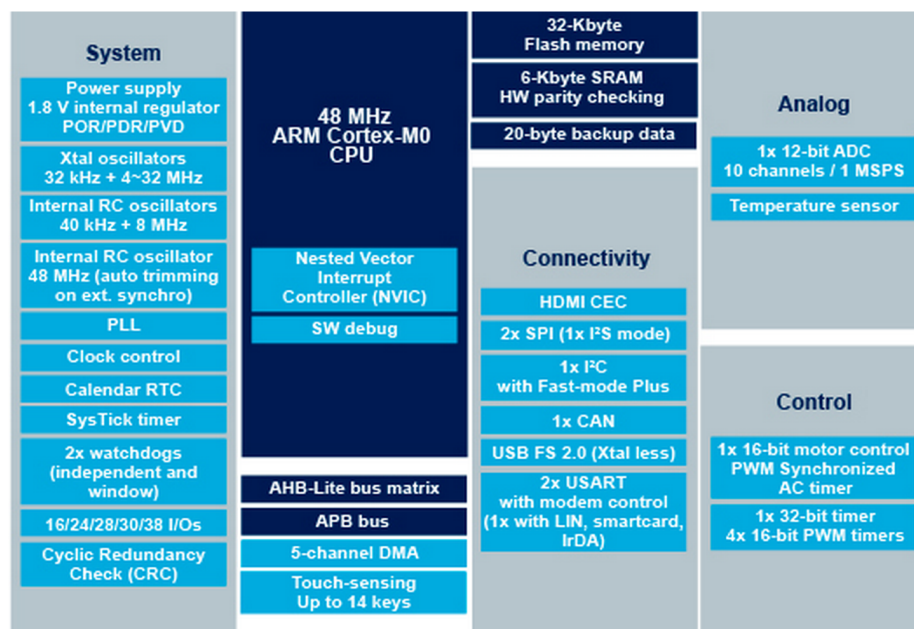
2.3 Použité integrované obvody

2.3.1 Mikroprocesor STM32F0xx

Řídícím prvkem měřicí jednotky IMU a centrální jednotky byl zvolen 32-bitový mikrokontrolér ARM s jádrem Cortex-M0 od firmy ST (STMicroelectronics) s nízkými energetickými nároky a dostatečným výpočetním výkonem. Jedná se konkrétně o typ STM32F042K6T6 s 32 kB Flash, 6 kB SRAM, operující na frekvenci 48 MHz CPU (centrální procesorová jednotka – Central Processing Unit), s rozšířeným počtem I/O pinů (vstupně/výstupní brány – Input/Output) a komunikačních periferií integrovaných přímo na čipu. Mikroprocesor nabízí standardní komunikační rozhraní

⁶Vytvořen funkční firmware centrální jednotky pro oba mikrořadiče STM32F042K6T6 a STM32F072RBT6.

I2C, 2xSPI, I2S, HDMI CEC, 2xUSART, dále A/D-D/A převodníky, časovače (16 a 32-bitové), PWM časovač a především nadstandardní periférie, jako jsou CRC, USB a CAN, který je v tomto projektu rozhodující.



Obr. 2.5: Blokové schéma mikrořadiče STM32F042K6T6

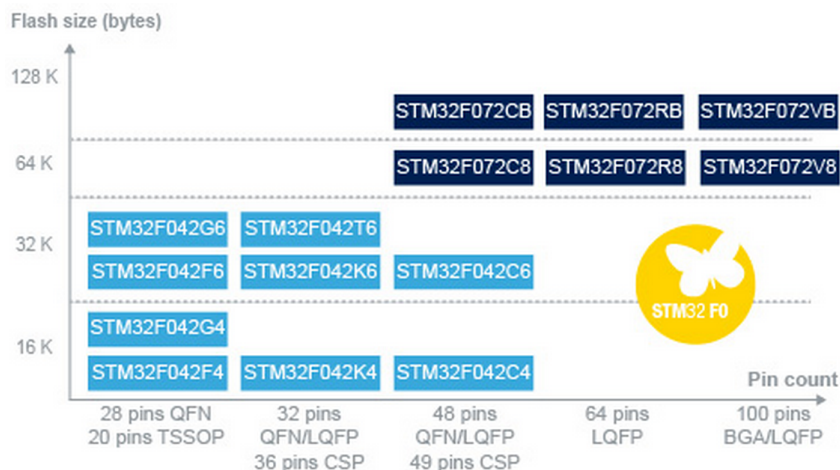
Mikrokontrolér obsahuje programovou paměť typu Flash o 32 kB a datovou paměť typu SRAM (statická paměť – Static Random Access Memory) o velikosti 6 kB. Na porovnání uvedu konkrétní čip z vyšší řady stejné rodiny STM32F072, u kterého se velikost paměti Flash pohybuje od 64 kB do 128 kB a SRAM činí 16 kB. Pro realizaci tohoto měřicího systému však STM32F042K6T6 postačí. Graf velikosti Flash paměti zobrazuje obrázek 2.6⁷.

V rámci snižování velikosti modulů bylo vybráno pouzdro mikrokontroléru LQFP32. Další možnou alternativou se zdálo být pouzdro TSSOP20 (STM32F042F4/F6), v případě připojení externího oscilátoru však vyvedení pinů nedovoluje využít I2C a CAN sběrnici zároveň⁸.

Soubor energeticky úsporných režimů nabízí možnosti snižování proudového odběru důležitého pro vývoj energeticky optimalizovaných aplikací. K maximálnímu energetickému snížení se naskytla možnost výběru "Ultra-low-power" řady STM32

⁷Graf Flash paměti i blokové schéma STM32F042K6T6 jsou převzaty ze stránek www.st.com.

⁸Pouze možnost přemapování pinů PA11/PA12(CAN) na PA9/PA10(I2C) za pomoci registru SYSCFG_CFGR1.



Obr. 2.6: Graf velikostí Flash paměti mikroprocesorové řady STM32F0x2

L0 a nižších řad STM32F0x1. Žádná z nich však nesplnila všechna požadovaná kritéria. Obě řady postrádají klíčovou sběrnici CAN.

Mikrokontrolér nabízí několik možností nahrávání programu do vnitřní paměti Flash. Jednou z možností je využití JTAG (JTAG rozhraní – Joint Test Action Group), standard definovaný normou IEEE 1149.1. Výhodou tohoto rozhraní je vyšší přenosová rychlost, standardně však musí být použito dvacetipinové fyzické vrstvy. V aplikaci je užito SWD⁹ (sériové ladící rozhraní - Serial Wire Debug), které poskytuje možnost ladění programu přímo na čipu a nevyžaduje vícečetnou kabeláž, plně postačí 4 konektory. V testovacím návrhu modulu je navíc navržen USB konektor (univerzální sériová sběrnice - Universal Serial Bus). Umožňuje jednak kontrolu vyčtených dat, jednak nahrávání programu do paměti za pomoci USB bootloderu a taktéž možnost napájení modulu.

2.3.2 MEMS senzor MPU-9150

Zahrnutí MEMS senzoru MPU-9150 od firmy InvenSense do systému je podmíněno jeho vysokou výkonností, přesností, nízkoenergetickou náročností, malými rozměry pouzdra a rychlostí odezvy pro zkoumání velmi rychlých reakcí. Tyto klady jsou však vykoupeny poměrně vysokou cenou.

Jedná se o světově první 9-osý MEMS senzor s 3-osým gyroskopem, 3-osým akcelerometrem, vestavěným 3-osým magnetometrem a teplotním senzorem a DMP.

⁹Více informací k SWD v [6] str. 11-12

MPU-9150 je tzv. SiP¹⁰ (System in Package) kombinující 2 čipy: MPU-6050, který obsahuje 3-osý akcelerometr, 3-osý gyroskop, DMP; a čip AK8975, který je sám o sobě 3-osý elektronický magnetometr. Vše je zasazeno do pouzdra LGA o velikosti 4x4x1 mm.

MPU-9150 obsahuje DMP (Digital Motion Processor), který slouží ke zpracování požadavků od hostitelského procesoru a k obsluze senzorů. DMP má také přístup k externímu pinu MPU-9150, který je použit k signalizaci přerušení. Jeho dalším úkolem je např. obsluha senzorů připojených k přídavné sběrnici I2C (ES_CL), kterou MPU-9150 nabízí.

MPU-9150 obsahuje tři 16-bitové A/D převodníky pro digitalizaci výstupu gyroskopu, tři 16-bitové A/D převodníky pro digitalizaci výstupu akcelerometru a tři 13-bitové A/D převodníky pro magnetometr. Pro snímání rychlých i pomalých pohybů jsou k dispozici programovatelné rozsahy gyroskopu $\pm 250, \pm 500, \pm 1000, \pm 2000$ °/sec (dps - degrees per second), rozsahy akcelerometru $\pm 2g, \pm 4g, \pm 8g, \pm 16g$ a rozsah magnetometru $\pm 1200\mu T$. MPU-9150 rovněž nabízí digitálně programovatelný Low-Pass Filter k využití pro všechny 4 senzory, 1024 B FIFO buffer, dále pak funkce k detekci a signalizaci orientace os akcelerometru, detekci klepání apod.

Zdrojem hodinového taktu může být externí signál o velikostech 32.768 kHz nebo 19.2 MHz, interní oscilátor o frekvenci 8 MHz nebo frekvence výstupu dat jedné osy gyroskopu. K dosažení vyšší stability zdroje je doporučeno použít externí oscilátor či frekvenci výstupu dat osy gyroskopu. V této práci je použita osa x gyroskopu.

Nastavením registru 25 (SMPLRT_DIV - Sample Rate Divider) lze dosáhnout požadovaného systémového vzorkovacího kmitočtu MPU-9150. Konfigurace se řídí dle vzorce

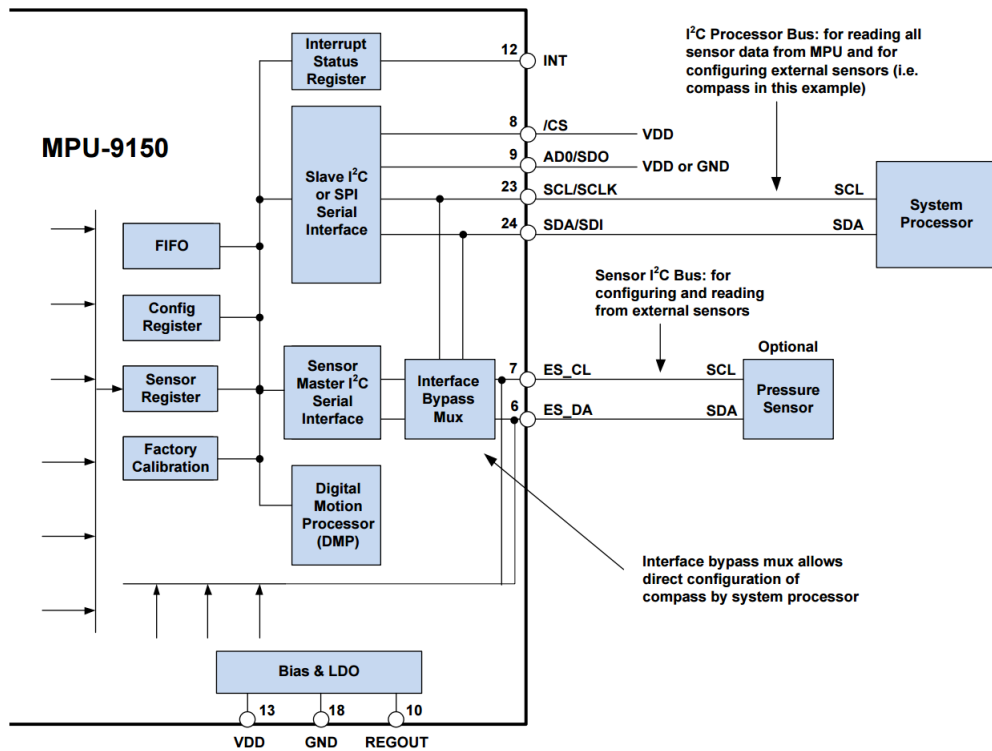
$$Sample\ Rate = \frac{Gyroscope\ Output\ Rate}{1 + Sample\ Rate\ Divider}. \quad (2.2)$$

Frekvence výstupu dat osy gyroskopu činí 8 kHz v případě vyřazení DLPF (digitální nízkofrekvenční pásmová propust – Digital Low Pass Filter) a 1kHz pokud je DLPF povolen. Frekvence výstupu akcelerometru je staticky rovna 1kHz, nový vzorek zrychlení je k dispozici každou milisekundu. Systémový hodinový takt všech MPU-9150 je v projektu nastaven na 500Hz (SMPLRT_DIV = 1). Důvody takovéto

¹⁰Také označováno jako MCM (Multi-Chip Module).

konfigurace jsou popsány v 2.5.2.

Komunikace mikroprocesoru se senzorem je, jak již bylo zmíněno, zajištěna sběrnicí I2C (SCL, SDA) o frekvenci 100 kHz nebo 400 kHz. Čip MPU-9150 obsahuje přídavné rozhraní I2C (ES_CL, ES_DA), ke kterému je připojen vestavěný magnetometr AK8975 a také je možnost k němu připojit až 4 další senzory. Přístupovat k zařízením připojeným přes přídavné I2C lze buď přímo, nastavením MPU-9150 do "Pass-Through Mode", který propojí primární linku I2C s přídavnou za pomoci multiplexeru, nebo nepřímo, nastavením MPU-9150 do "I2C Master Mode"¹¹. Při nepřímém přístupu je ale třeba nastavit příslušné slave registry MPU-9150 pro konfiguraci a čtení externích senzorů. Data jsou následně k dispozici v registrech 73 - 96 (EXT_SENS_DATA_XX[7:0]) čipu MPU-9150.



Obr. 2.7: Částečné blokové schéma zapojení MEMS senzoru MPU-9150

Při konfiguraci čipu do "I2C Master Mode" je frekvence žádosti dat od magnetometru určena registrem 52 (I2C Slave 4 Control - I2C_MST_DLY[4:0]), vzorcem

$$\frac{1}{1 + I2C \text{ Master Delay}} \text{ samples}, \quad (2.3)$$

¹¹Blokové schéma zobrazené na obr. 2.7 je převzato z dokumentace [8]

kde výsledné číslo udává četnost přístupu ke slave zařízení v porovnání se systémovým kmitočtem MPU-9150. Tato frekvence přístupu je tedy nepřímo určena dvěma registry 25 (SMPLRT_DIV) a 26 (DLPF_CFG).

Výrobce magnetometru AK8975 v katalogu [11] specifikuje nejkratší možnou dobu jednoho měření 9 ms. MPU-9150 je nastaven tak, aby byl magnetometr maximálně využit. Frekvence přístupu DMP k magnetometru tedy činí 111.11 Hz ($\frac{1}{9}$ ¹² systémové frekvence). Magnetometr po vyčtení dat okamžitě automaticky přechází do "Low Power Mode", kde setrvává do další žádosti o data.

Energetická spotřeba není v dokumentu [8] nijak specifikována, pouze je stanoven proudový odběr v módu "Accelerometer Low Power Mode Current". Tento mód však počítá pouze se zapnutým akcelerometrem a maximální frekvencí aktualizace dat 40 Hz. Výrobce magnetometru AK8975 v dokumentaci [11] uvádí proudový odběr 10 μA v "Power Down Mode" a 350 μA v případě 8 Hz "Repetition Mode". Frekvence přístupu ("Repetition Mode") DMP k magnetometru je však nastavena na 111.11 Hz, z čehož lze usuzovat mnohem vyšší spotřebu než 350 μA .

2.3.3 Napěťový regulátor ADP3301 a LF33CDT

K regulaci napěťové úrovně je použit napěťový stabilizátor ADP3301-3.3 [12] od firmy Analog Devices. Zařízení se vyznačuje vysokou přesností regulace $\pm 0.8\%$ při teplotě 25°C a malým dropout napětím typicky 100mV. Zařízení je uloženo v malém SMD (součástka pro povrchovou montáž plošných spojů – Surface Mount Device) pouzdře SOIC-8.

V testovacím modulu byl použit regulátor LF33CDT-3.3 [7] od firmy ST v pouzdře DPAK. Důvodem jeho nevyužití ve finální verzi byla především velikost pouzdra, vyšší šumová hladina a také vyšší dropout napětí oproti zařízení ADP3301. Výrobce LF33CDT uvádí 450mV dropout.

2.3.4 CAN budič SN65HVD231Q

CAN budič je zařízení, které tvoří rozhraní mezi řadičem¹³ CAN a přenosovou datovou sběrnicí CAN (viz. 2.8). Převádí signálové úrovně CANH a CANL na CMOS

¹²Do registru 52 je do prvních 5 bitů (I2C_MST_DLY[4:0]) zapsána hodnota 8.

¹³Řadičem je v tomto případě periferie MCU.

úrovně CAN RX, CAN TX akceptovatelné řadičem. Obr. 2.9 v podsekcí 2.4.1 znázorňuje tyto napěťové úrovně.

Z kandidátů MCP2551-I/SN, SN65HVD230Q, SN65HVD231Q, SN65HVD232Q byl vybrán typ SN65HVD231Q [13] od firmy Texas Instruments. Porovnání rozhodujících parametrů¹⁴ a důležitých faktorů znázorňuje tabulka 2.1.

Typ	Mód	Výstupní U[V]	Cena [Kč/ks]
MCP2551	High-speed, standby, slope-control	5	28,42
'230Q	370 μ A standby, slope-control	3,3	50,00+
'231Q	10 μ A sleep, slope-control	3,3	50,00+
'232Q	No standby or sleep or slope-control	3,3	50,00+

Tab. 2.1: Porovnání rozhodujících parametrů při výběru budiče sběrnice CAN

Typ SN65HVD231Q vyhovoval nízkoenergetickým nárokům svým nízkým odběrem ve sleep modu a poskytuje navíc funkci slope-control k nastavení rychlosti změny¹⁵ napěťové úrovně v rozmezí 2 V/ μ s až 15 V/ μ s. Výstup činí námi požadovanou hodnotu 3.3 V oproti typu MCP2551-I/SN.

Navržený testovací modul neobsahuje CAN budič. Při vývoji byl k buzení fyzické komunikační linky použit modulek SN65HVD230 CAN Board od výrobce Waveshare Electronics.

2.4 Použité komunikační protokoly

2.4.1 Komunikační protokol CAN

Datová komunikační sběrnice CAN (CAN sběrnice – Controller Area Network bus) vznikla v 80. letech 20. století v laboratořích německé firmy Robert Bosch GmbH za účelem využití v automobilovém průmyslu. Oblasti použití sběrnice CAN jsou pak např. v robotice, zpracovatelském průmyslu, informačních systémech, lékařské technice apod.

Prvotním záměrem bylo snížení počtu kabelů fyzické vrstvy na minimum a umožnit její společné využití všemi řídicími jednotkami (ABS, automatická převodovka,

¹⁴Ceny uvedené na stránkách www.cz.farnell.com k datu 21.4.2015.

¹⁵V anglické literatuře označováno jako tzv. "slew rate".

řídící jednotky motoru). Komunikace dřív probíhala zvláště po jednotlivých metalických linkách, které zabíraly velký prostor vozidla. Komunikace tak byla nepřehledná a složitá.

Komunikační protokol CAN je definovaný normou ISO 11898, která popisuje fyzickou vrstvu a specifikuje dva typy: CAN 2.0A a CAN 2.0B. CAN 2.0B přináší rozšíření identifikátoru zprávy, přičemž lze použít identifikátor standardní nebo rozšířený.

CAN je sériový komunikační multi-master protokol, umožňující distribuované řízení v reálném čase s dostatečným zabezpečením proti vzniku chyb. Každé zařízení může být typu master a kontrolovat tak jiné uzly. Není nutností řídit celý systém z jednoho centrálního uzlu a výhodou je tedy nezávislost systému na funkčnosti jednoho zařízení.

Pro řízení přístupu k médiu je použita metoda náhodného přístupu ke sběrnici s prioritním rozhodováním, které zaručuje okamžité doručení zprávy s největším významem. V síti pak vyslanou zprávu může přijmout libovolný počet uzlů na základě identifikátoru zprávy, který značí význam a prioritu (nikoli adresáta či odesílatele). Komunikace tak funguje na principu broadcastu (producent-konzument).

Sběrnice CAN je rozdělena do 3 vrstev vycházejících z modelu ISO/OSI:
objektová, transportní, fyzická

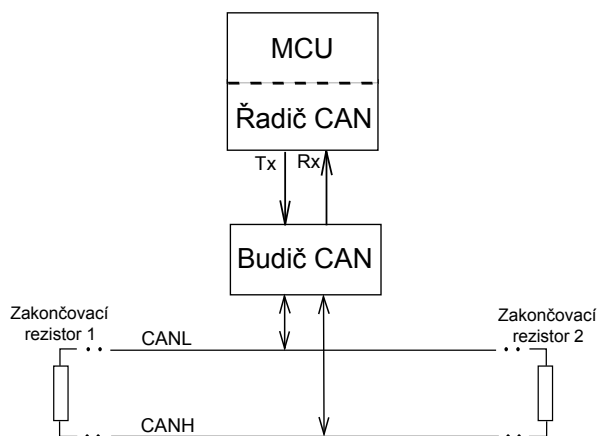
Objektová vrstva se stará o nalezení zpráv určených k vyslání na sběrnici, filtraci zpráv přijatých od transportní vrstvy, hlášení o přetížení a poskytuje rozhraní mezi aplikační vrstvou a hardwarem.

Transportní vrstva obstarává přenosový protokol, který slouží k řízení datových rámců, řízení přenosové rychlosti a časování, obsluze CRC (cyklický redundantní součet – Cyclic Redundancy Check), signalizaci chyb, signalizaci statusu sběrnice a řízení přístupu k médiu.

Fyzická vrstva má za úkol vlastní přenos informace a dodržení všech elektrických specifikací sběrnice. Definuje reprezentaci jednotlivých bitů a úrovní signálu. Fyzická vrstva jedné sítě musí být totožná pro všechny její uzly.

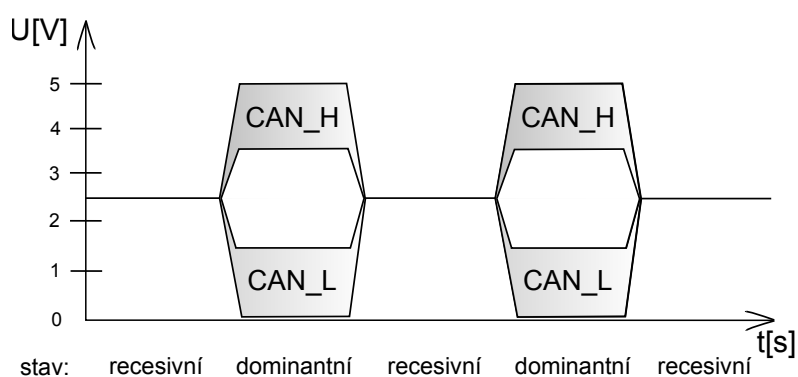
Přenosové médium k přenosu informace využívá kroucené dvojlinky, která snižuje

přeslechy přenosu. Dále jsou pak součástí jednotlivé uzly systému, které nesmějí postrádat CAN budič (elektrické signály sběrnice převádí na data řadiče a obráceně) a CAN řadič (implementuje linkovou vrstvu protokolu). Datová sběrnice je po obou koncích zakončena dvěma terminátory - rezistory. Model fyzického rozhraní jednotky je zobrazen na obr. 2.8



Obr. 2.8: Implementace jednotky se sběrnici CAN

Úroveň elektrického signálu na sběrnici je určena dvěma stavy, stavem dominant (aktivní stav - log.0) a stavem recessive (pasivní stav - log.1), velikosti rozsahů úrovní ilustruje obr. 2.9.



Obr. 2.9: Úrovně elektrických signálů sběrnice CAN

Sběrnice CAN musí splňovat základní požadavek na realizaci logického součinu¹⁶. Ten umožňuje funkci prioritního rozhodování při přístupu uzlů k médiu. Každý

¹⁶V anglické literatuře jako wired AND.

zprávu (dominantní stav) nebo žádost o data (recesivní stav); **R1, R0** - rezervované bity; **DLC** (Data Length Code) - udává počet bajtů ve zprávě; **DATA** - samotná data; **CRC** (cyklický redundantní součet – Cyclic Redundancy Check) - cyklický redundantní součet, detekce chyb; **ERC** (End of CRC) - oddělovač (vždy recesivní stav); **ACK** (Acknowledge) - potvrzovací bit; **ACD** (Acknowledge Delimiter) - oddělovač (vždy recesivní stav); **EoF** (End of Frame) - konec rámce (7 bitů v úrovni recessive); **IFS** (Interframe Space) - mezirámcová mezera (3 bity v úrovni recessive).

Žádost o data je podobná klasické datové zprávě s tím rozdílem, že bit RTR je nastaven do recesivní úrovně (datová zpráva má přednost před žádostí o data) a chybí datová část. Žádá-li uzel o data, nastaví identifikátor žádosti na hodnotu požadované zprávy.

Chybová zpráva signalizuje výskyt chyby na sběrnici. Zjistí-li uzel chybu (chyba CRC, chyba bitu, chyba vkládání bitu, chyba rámce), vyšle 6 po sobě jdoucích dominantních či recesivních bitů dle stavu v němž se aktuálně nachází. Tato sekvence bitů poruší strukturu datového rámce vzhledem ke vkládání bitů a tak začnou vysílat chybové zprávy i ostatní uzly. Vyhodnocení chyb je pak provedeno superpozicí všech chybových zpráv na sběrnici. Komunikační protokol CAN tak zachovává jednotnost příjmu dat. Datovou zprávu přijmou všichni zájemci, nebo žádný.

Všechny uzly obsahují 2 počítadla, která určují počet chyb při příjmu a vysílání. Podle hodnot v čítadlech přechází uzel mezi třemi stavy: **aktivní, pasivní, odpojený**. Po resetu zařízení se čítače nulují.

Aktivní (Active) uzel se podílí aktivně na komunikaci a vysílá chybovou zprávu v podobě 6 dominantních bitů za sebou.

Pasivní (Passive) uzel překročil danou mez čítadla, ale stále se aktivně podílí na komunikaci, vysílá však chybovou zprávu o sekvenci 6 recesivních bitů

Odpojený (Buss-off) uzel nemá žádný vliv na komunikaci. Jeho budič je odpojen.

Vkládání bitů¹⁸ je důležitou vlastností protokolu CAN. Je-li na sběrnici vysláno 5 po sobě jdoucích bitů, je následně automaticky vložen bit opačné úrovně. Příjemcem jsou vložené bity zase vyjmuty. Vkládání bitů zajišťuje správnou synchronizaci přijímacích uzlů a zároveň slouží k detekci chyb.

CAN v praktických aplikacích dosahuje přenosové rychlosti až 1Mb/s při fyzické

¹⁸V anglické literatuře též označováno jako bit stuffing.

délce sběrnice do 40m. S vyššími délkami pak přenosová rychlost klesá. Tabulka 2.2¹⁹ uvádí tuto závislost.

Přenosová rychlost [Mb/s]	Délka sběrnice [m]	Nominální délka bitu [μ s]
1	40	1
0,5	100	2
0,25	200	4
0,10	500	10
0,05	1000	20

Tab. 2.2: Závislost rychlosti přenosu na délce sběrnice

Jelikož fyzická implementace protokolu CAN nezahrnuje linku hodinového signálu a každý uzel má vlastní oscilátor s danou frekvenční tolerancí, může mezi vysílajícími a přijímacími uzly docházet k fázovému posunu. Synchronizace uzlů je prováděna za pomoci bitového časování²⁰, které také určuje rychlost přenosu dat.

Po vyslání datového rámce na sběrnici nejprve dochází k tzv. hard-synchronizaci a následně pak každá změna napěťové úrovně na sběrnici je využita k synchronizaci někdy označované také jako resynchronizace. K její udržení taktéž přispívá vkládání bitů.

Nominální délka bitu, jak je popsáno v [17], je rozdělena na 4 časové segmenty a je rovna inverzní hodnotě přenosové rychlosti, tedy

$$\text{Nominální délka bitu} = \frac{1}{\text{Rychlost přenosu}} \quad (2.4)$$

Prvním časovým segmentem je synchronizační segment (SYNC SEG), který je vždy délky jednoho časového kvanta²¹ t_q a je v něm očekávána příchozí hrana signálu. Druhým segmentem je tzv. propagační segment (PROP SEG), který kompenzuje dobu bitového signálu. Objeví-li se v něm příchozí hrana signálu, je prodloužen segment PHASE SEG1 o SJW²² (Synchronization Jump Width (1 - 4 t_q)). Pokud je příchozí hrana detekována před SYNC SEG, příjemce zkrátí bitový segment PHASE SEG2. Třetí a čtvrtý segment (PHASE SEG1, PHASE SEG2) je tedy použit k regulaci vzájemných fázových posunů uzlů. Vzorkovací bod leží mezi těmito dvěma

¹⁹Zdrojem hodnot je dokument [14].

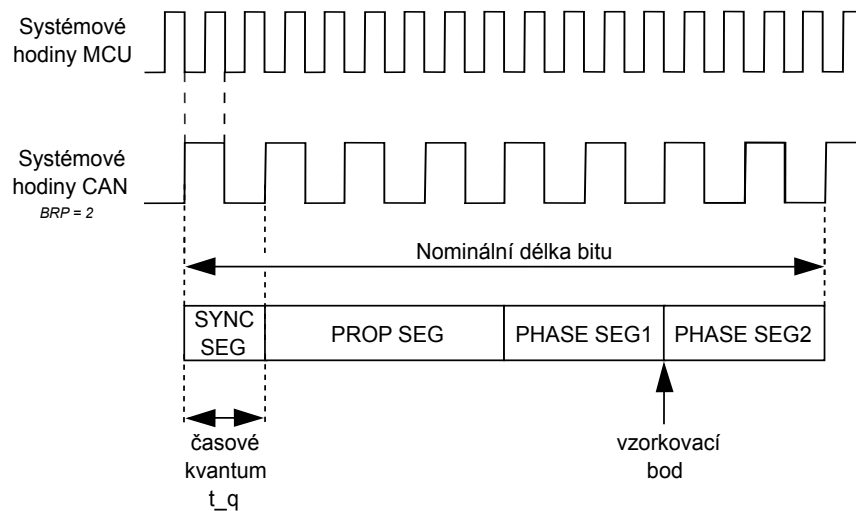
²⁰Anglický též bit-timing

²¹Z anglického Time Quantum.

²²Někdy také označován jako RJW - Resynchronization Jump Width.

segmenty.

Časové kvantum t_q je závislé na délce hodinového pulzu CAN odvozeného od systémových hodin mikrokontroléru za pomoci předděliče Baud Rate Prescaler. Příklad závislosti je zobrazen obrázkem 2.12



Obr. 2.12: Nominální délka bitu a její závislost na frekvenční konfiguraci systému

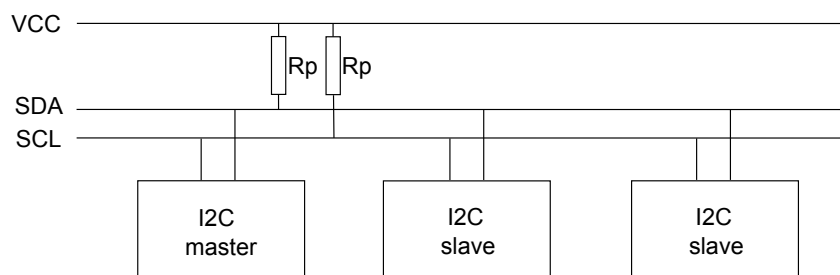
Při výběru CAN sehrála velikou roli především fyzická realizace sběrnice a postačující komunikační rychlost. Stačí pouze 2 metalická vedení např. oproti SPI, které implementuje 4 dráty a s jeho použitím by byla ve finále potřeba tahat ke každé jednotce 4 metalické linky. Spotřeba obou periférií SPI a CAN na mikrokontroléru STM32F042K6T6 dle softwaru STM32CubeMX je přibližně stejná.

Jako zdroj informací o protokolu CAN posloužily [15], [16] a [18]. Další zdroje jsou uvedeny v textu.

2.4.2 Sériová sběrnice I2C

I2C (I2C sběrnice – Inter-Integrated Circuit) je multi-masterová nízkofrekvenční komunikační sběrnice sloužící k propojování integrovaných obvodů a periférií. Byla vyvinuta firmou Philips.

Fyzická sběrnice je realizována dvěma vodiči. První SCL (Synchronous Clock) je použit pro přenos synchronního hodinového signálu a druhý SDA (Synchronous Data) poskytuje plně duplexní datový přenos. Obě linky jsou připojeny k napájení přes pull-up rezistory, klidová úroveň signálu je tak log.1.



Obr. 2.13: Fyzická realizace sběrnice I2C

Bližší informace ke komunikačnímu protokolu I2C lze nalézt například na [19].

2.4.3 Další použitá komunikační rozhraní

USART (univerzální synchronní/asynchronní přijímač/vysílač – Universal Synchronous/Asynchronous Receiver/Transmitter) je sériový komunikační protokol umožňující využití synchronního i asynchronního typu přenosu dat (využívají např. sériové linky RS232 a RS485).

Každé zařízení s podporou rozhraní UART poskytuje 2 piny - Rx pro příjem dat a Tx pro vysílání dat. Klidovým stavem komunikační linky je log.1. Asynchronní přenos zahrnuje 8 přenesených bitů, 1 start bit (log.0) a 1 stop bit (log.1).

Dalšími použitými rozhraními v systému jsou pak SWD, WLAN a v testovacím modulu navíc USB.

2.5 Realizace komunikace

Základní schéma komunikace již bylo popsáno. Tato sekce se podrobněji zabývá jednotlivými komunikačními rozhraními, samotnou komunikací mezi moduly, synchronizací, přenosovými rychlostmi a frekvenčním nastavením zařízení systému.

2.5.1 Základní komunikace mezi moduly

Veškerá komunikace za pomoci protokolu CAN funguje na principu broadcastu. Protože jedinou možnou cestou dopravy dat do PC je přes centrální jednotku, řízení všech měřících IMU modulů je přenecháno jí. V tomto případě je to nejjednodušší a nejspolehlivější možnost ovládní systému, jelikož při výpadku centrálního uzlu by

stejně systém nemohl samostatně fungovat. Z tohoto pohledu se tedy jedná o centralizovaný typ řízení.

Centrální jednotce jsou k dispozici dvě zprávy. První (zpráva typu žádost o data 2.4.1) má význam hromadného příkazu k jednorázovému změření veličin MEMS senzorů IMU jednotek, které mají za úkol naměřená data okamžitě vyslat na sběrnici. Druhá zpráva (typu datová zpráva 2.4.1) je významu konfiguračního a dle jejího datového obsahu jednotky specifikují o jaký typ žádosti konfigurace se jedná (nastavení rozsahů akcelerometru a gyroskopu, vypnutí 2. MEMS senzoru, odečtení offsetů gyroskopu) a jakou hodnotu mají nastavit.

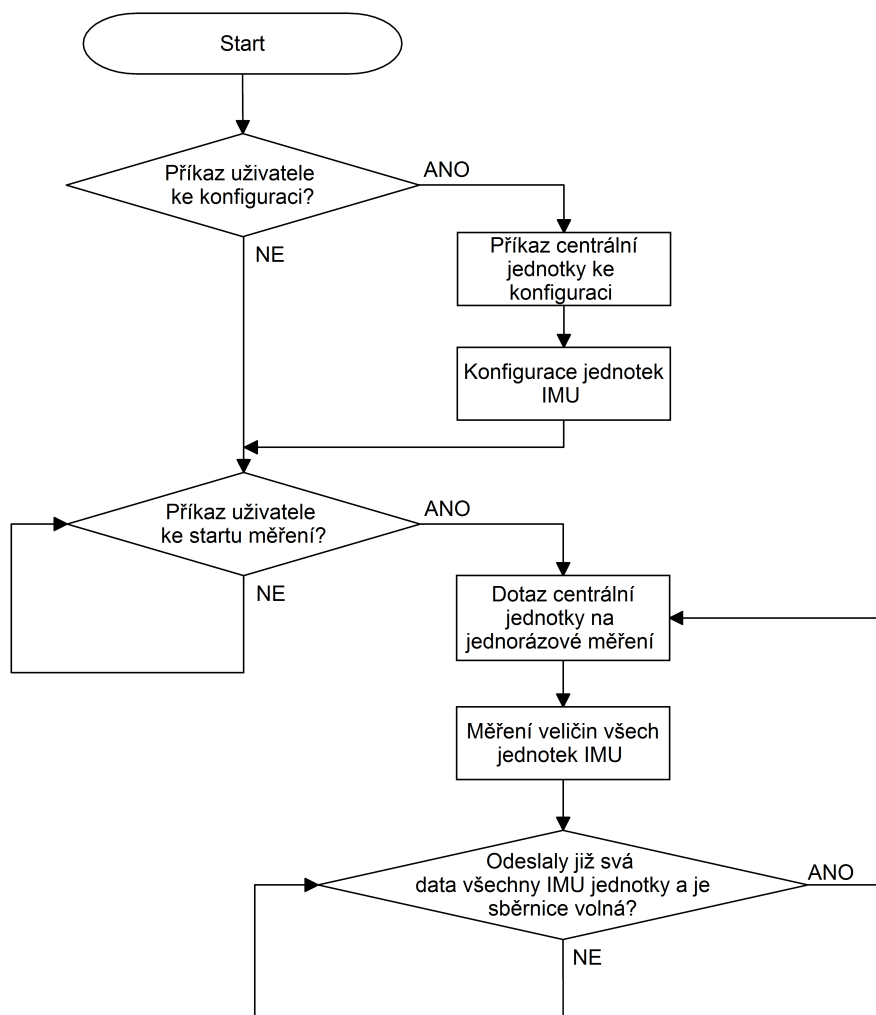
Všechny datové zprávy IMU jednotek mají teoreticky stejný význam i prioritu. Nemohou mít však stejný identifikátor (ID), protože při současném přístupu jednotek ke sběrnici by došlo k chybě vkládání bitů s následným opětovným pokusem o vyslání dat (chybová zpráva v 2.4.1).

Aby bylo možno rozeznat naměřená data jednotlivých IMU jednotek, musí mít každá jednotka přiřazené vlastní identifikační číslo, které je zapsáno právě do identifikátoru datové zprávy protokolu CAN. V tomto případě je tedy ID použito k rozeznání odesílatele, nikoli k určení významu či priority zprávy.

Návrh komunikace systému musí zaručovat příjem všech naměřených dat bez preference. Toho je dosaženo nastavením identifikátoru centrální jednotky na vyšší hodnotu, než je hodnota počtu použitých měřících IMU modulů za předpokladu číslování a nastavení identifikátorů zpráv 1, 2, 3, ... , n-1, n. Díky prioritnímu rozhodovacímu systému protokolu CAN nedostane centrální uzel možnost přístupu ke sběrnici dříve, než mu na jeho dotaz svá data odešlou všechny měřící jednotky. Základní princip je taktéž popsán diagramem na obr. 2.14

Komunikace mezi centrálním uzlem a Wi-Fi modulem je zprostředkována za pomoci sériové linky UART (viz 2.4.3). UART nenabízí tak sofistikovaný způsob přenosu dat, jako je tomu v případě komunikačního protokolu CAN. Data jsou posílána po jednotlivých bajtech bez jakékoli přídavné informace o jejich významu či odesílateli. PC aplikace však musí být schopna přijatá data od jednotlivých měřících jednotek rozeznat a tak je důležité specifikovat strukturu, podle které se bude centrální uzel i PC aplikace řídit.

Rámec s 6 bajty (viz. 2.5.2) přijatý centrálním uzlem od IMU jednotky je okamžitě preposlán přes UART do PC. Nejdříve je ale přečteno a vysláno ID značící



Obr. 2.14: Základní princip dotazování centrálního uzlu jednotek IMU

odesílatele. Následný datový rámec od stejné IMU ale od jiného senzoru (gyroskop, akcelerometr, magnetometr) je poslán stejným způsobem. Po každých 6 bajtech poslaných přes UART od každého ze 3 senzorů MEMS senzoru tedy předchází jeden bajt identifikující odesílatele (IMU). 11-bitový identifikátor datového rámce CAN je tak oříznut na 8 bitů. To však ničemu nevádí, pouze počet jednotek IMU je omezen na 256.

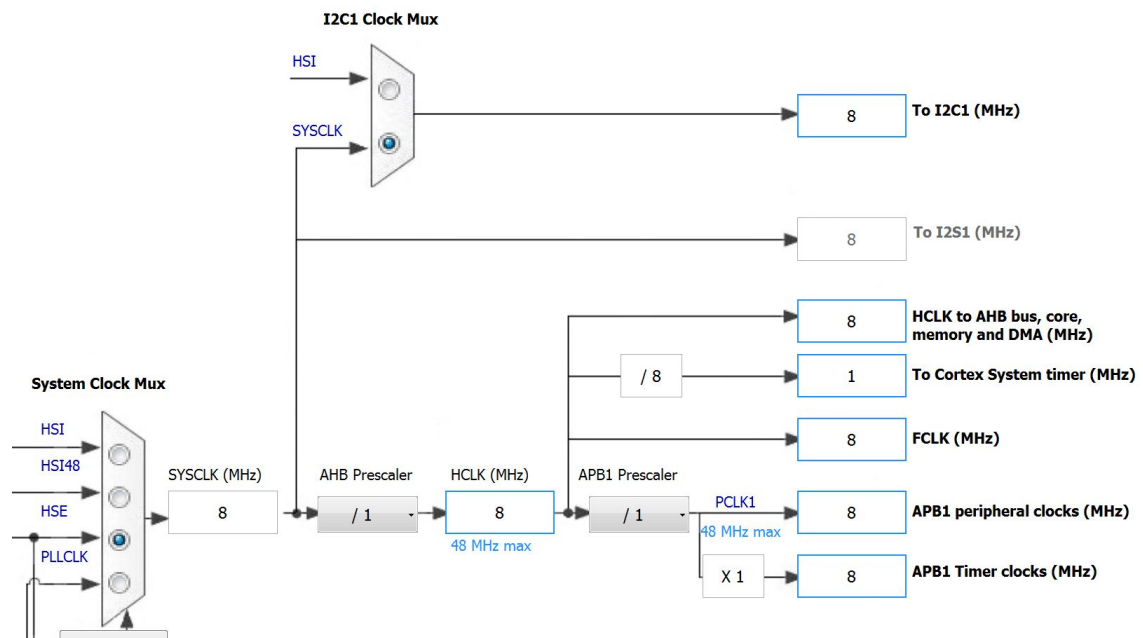
Nevýhodou výše popsané struktury je ale fakt, že PC aplikace není schopna rozeznat a určit jednotlivá data od identifikačních bajtů. Aplikace by resp. mohla být schopna tyto bajty rozeznat, její softwarový návrh by však musel být poněkud složitější. Proto centrální uzel před tím než vyšle IMU jednotkám hromadný dotaz na data, pošle přes USART 4 bajty vždy stejné hodnoty, podle kterých se PC aplikace

synchronizuje a považuje je vždy za počátek jednorázového měření.

Data jednotlivých os senzorů jsou do PC posílána v surovém 16-bitovém tvaru. Tím bylo docíleno přenosu max. počtu vzorků ze jednotku času.

2.5.2 Optimalizace a frekvenční nastavení MCU a MEMS

Každý kontrolér tohoto systému využívá jako zdroj hodinového signálu externí oscilátor o velikosti 8MHz. Aby bylo dosaženo max. přenosové rychlosti sběrnice CAN, je třeba nastavit frekvenci f_{PCLK} periferie APB mikrokontroléru min. na 8MHz (důvody popsány na konci 2.5.3). Konfigurace systémových hodin je zobrazena na obr. 2.15²³



Obr. 2.15: Schématické zobrazení konfigurace systémových hodin

Celkové frekvenční seřazení systémových hodin MPU-9150 z hlediska minimalizace energetických ztrát a maximalizace výkonu se odvíjí od přenosové rychlosti sběrnice CAN a celkového počtu měřících jednotek IMU použitých v systému. Následujícími výpočty docházím k nastavení systémového hodinového taktu MEMS senzorů MPU-9150.

Datový rámec komunikačního protokolu CAN může obsahovat maximálně 8 bajtů (datová zpráva v 2.4.1). Protože pro přenos dat jednoho senzoru je třeba

²³Jako printscreen posloužila aplikace STM32CubeMX od firmy ST.

6 bajtů (3 osy x 16 bitů), je za každý senzor (gyroskop, akcelerometr, magnetometr) poslán zvlášť 1 datový rámec o délce dat (DLC) 6 bajtů. Za každý měřicí modul IMU jsou tedy vyslány 3 datové rámce (3 senzory) na žádost jednoho měření (1 vzorek). Jeden datový rámec tak zabere:

$$\begin{aligned} & \text{SoF}(1) + \text{ID}(11) + \text{RTR}(1) + \text{R1}(1) + \text{R0}(1) + \text{DLC}(4) + \text{DATA}(3 \times 16 = 48) + \\ & + \text{CRC}(15) + \text{ERC}(1) + \text{ACK}(1) + \text{ACD}(1) + \text{EoF}(7) + \text{IFS}(3) = 95 \text{ bitů} \end{aligned} \quad (2.5)$$

Tři datové rámce zaberou:

$$3 \text{ senzory} \times 95 \text{ bitů} = 285 \frac{\text{bitů}}{\text{IMU}} \quad (1 \text{ vzorek}) \quad (2.6)$$

Jak již bylo zmíněno pro demonstrační účely postačilo 8 měřících jednotek a 1 centrální. Maximální přenosová rychlost sběrnice CAN činí 1Mbit za sekundu. Pak je schopna přenést jedné IMU

$$\frac{1 \text{ Mbit}}{8 \text{ IMU}} = 125\,000 \frac{\text{bitů}}{\text{s}} \quad (2.7)$$

Pro optimální frekvenční nastavení MEMS senzorů MPU-9150 je třeba znát maximální možný objem vzorků, který dokáže sběrnice CAN přenést od jedné IMU jednotky za jednotku času.

$$\frac{125\,000 \frac{\text{bitů}}{\text{s}}}{285 \frac{\text{bitů}}{\text{IMU}}} \doteq 439 \frac{\text{vzorků}}{\text{s}} / \text{IMU} \quad (2.8)$$

Posledním výpočtem je dosaženo závěru, že sběrnice CAN při využití osmi měřících jednotek IMU je teoreticky schopna přenést jedné jednotce maximálně²⁴ 439 naměřených vzorků za sekundu. Systémové hodiny MPU-9150 jsou proto nastaveny na nejbližší možnou hodnotu 500Hz a nový vzorek je tak k dispozici každé 2ms (způsob konfigurace v 2.3.2). Aby byla žádost o data co nejrychleji obsloužena, je nastavena rychlost I2C rozhraní na 400kHz.

²⁴Není započítána možnost výskytu chyb a tak opakovaného vysílání datových zpráv ani pravděpodobný počet vložených bitů.

Rychlost přenosu dat komunikačního rozhraní UART musí být nastavena tak, aby bylo schopno přenést všechna požadovaná data. Rovnicí

$$\frac{\text{Velikost potřebná k přenosu 6 bajtů rozhraním UART}}{\text{Velikost CAN rámce s 6 datovými bajty}} \times MFC \quad (2.9)$$

$$\frac{70 \text{ bitů}}{95 \text{ bitů}} \times 1 \text{ Mbaud} \doteq 0,737 \text{ Mbaud} \quad (2.10)$$

dostaneme minimální rychlost přenosu dat, na kterou musí být rozhraní UART nastaveno. MCF v rovnici 2.9 je maximální přenosová rychlost CAN. Čítatel vychází z funkce protokolu UART 2.4.3, kde 6 datových bajtů zabere 60 bitů (8 bajtů + 1 stop bit + 1 start bit) a dalších 10 bitů je vyhrazeno identifikačnímu číslu. Jmenovatel vychází z rovnice 2.5. Přenosová rychlost UART je nastavena na 921600 Baudů.

2.5.3 Konfigurace přenosové rychlosti CAN

Další klíčovou konfigurací jest konfigurace přenosové rychlosti všech řadičů CAN. Ta musí být bezprostředně stejná pro všechny komunikační uzly.

Přenosová rychlost a parametry bitové synchronizace se nastavují programově příslušnými registry řadiče CAN. Parametry mikrokontrolérů STM32F0, které lze nastavovat, jsou: **BS1** (Bit Segment 1), **BS2** (Bit Segment 2), **SJW** (Synchronization Jump Width), **BRP** (Baud Rate Prescaler).

BS1 (PHASE SEG1 + PROP SEG)(viz. obr. 2.12) může být nastaven v rozmezí 1 - 16 časových kvant t_q .

BS2 (PHASE SEG2) může být nakonfigurován v rozmezí 1 - 8 časových kvant t_q .

SJW může být nakonfigurován v rozmezí 1 - 4 časových kvant t_q .

BRP může dosahovat max. hodnoty 512 (BRP[9:0]).

Časové kvantum t_q je vždy odvozeno od velikosti parametru Baud Rate Prescaler, který je nepřímým předděličem systémových hodin kontroléru (viz. obr. 2.12). BRP je v pořadí až třetím děličem za děliči AHB (Advanced High-performance Bus) a APB (Advanced Peripheral Bus) a dělí tak výslednou frekvenci f_{PCLK} periferie APB. Toto dělení znázorňuje obrázek topologického stromu 2.15 konfigurace systémového kmitočtu. Synchronizační segment (SYNC SEG) je vždy roven jednomu časovému kvantu.

Výpočet parametrů t_{BS1} a t_{BS2} provedeme následujícími kroky:

$$\text{Nominální délka bitu} = t_q + t_{BS1} + t_{BS2} \quad (2.11)$$

$$t_q = \frac{BRP}{f_{PCLK}}, \quad (2.12)$$

kde f_{PCLK} je frekvence periferie APB. Dosazením vztahu 2.12 do rovnice 2.11 a následnou úpravou této rovnice docílíme:

$$t_{BS1} + t_{BS2} = \text{Nominální délka bitu} - \frac{BRP}{f_{PCLK}} \quad (2.13)$$

Abychom dostali max. rychlost přenosu 1Mbit/s, musí dle vztahu 2.4 ($\text{Nominální délka bitu} = \frac{1}{\text{Rychlost přenosu}}$) být nominální délka bitu rovna $1 \mu s$. Dosazením frekvence f_{PCLK} (8MHz) (obr. 2.15), hodnoty BRP (1) a nominální délky bitu ($1 \mu s$) do vztahu 2.13 dostaneme:

$$t_{BS1} + t_{BS2} = 0,875 \mu s \quad (2.14)$$

Je třeba rozdělit délku mezi oba segmenty t_{BS1} a t_{BS2} . Vzorkovací bod zvolíme v 75% nominální délky bitu.

$$1 - \frac{t_{BS2}}{t_{BS1} + t_{BS2} + t_q} = 0,75 \quad (2.15)$$

Úpravou rovnice 2.15 a dosazením za t_q ($0,125 \mu s$) ze vztahu 2.12 a dosazením za $t_{BS1} + t_{BS2}$ ($0,875 \mu s$) ze vztahu 2.14 dostaneme:

$$t_{BS2} = 0,25 \mu s \quad (2.16)$$

Dosazením vypočtené hodnoty t_{BS2} do vztahu 2.15 dostaneme hodnotu $t_{BS1} = 0,625 \mu s$. Poměr jednotlivých částí nominální délky SYNC SEG:(PHASE SEG1 + PROP SEG):PHASE SEG2 je roven 1:5:2 a časových kvant je tedy celkem osm. SJW nastavíme na hodnotu 2.

Frekvence f_{PCLK} musí být rovna min. 8 MHz. Pokud by byl nastaven nižší kmitočet 4 MHz, zbývalo by (dle vzorce 2.12) jedno časové kvantum t_q pro každý ze čtyř segmentů nominální délky bitu. Při nižších frekvencích systémových hodin

MCU než je 8 MHz lze tedy dosahovat pouze nižších přenosových rychlostí sběrnice CAN než je 1 Mb/s.

2.5.4 Bezdrátový přenos dat do PC

Pro bezdrátovou komunikaci s nadřazeným počítačem je využit Wi-Fi modul WiFly GSX RN-131 od firmy Microchip s vestavěným modulem pro bezdrátový přenos standardu IEEE 802.11b/g. Modul se vyznačuje nízkým proudovým odběrem, jednoduchou konfigurací, dosahem signálu až 100 metrů, rychlostí přenosu rozhraní UART až 2,7Mb/s a rychlost přenosu dat s využitím protokolu TCP/IP až 4Mb/s.

Konektor USB-Mini obsažený v modulu nabízí spojení s PC. Samotná konfigurace modulu pak probíhá za pomoci PC terminálu a sady výrobcem definovaných příkazů a zajišťuje tak jednoduchou konfiguraci.

Komunikaci zajišťuje protokol TCP, který je v porovnání s UDP potvrzovaný a spojovaný a zajišťuje tak spolehlivé doručení dat včetně správného pořadí. Nevýhodou oproti UDP je pomalejší odezva. WiFly modul však nabízí rychlost přenosu dat až 4Mb/s při použití TCP/IP se zabezpečením WPA2, což je v tomto případě postačující.

Počítač zde v podstatě hraje roli AP (přístupový bod – Access Point). PC může být nastaveno do pozice AP za pomoci příkazové řádky, pomocí aplikace mHotspot Free nebo přímo použitím routeru, který je připojen k PC ethernetovým kabelem. V této práci je použita poslední vyjmenovaná možnost. WiFly modul se k routeru automaticky připojuje jako klient se statickou IP adresou 192.168.100.120 a SSID "motion". Přijímá data na portu 2000.

Další možnou variantou bylo nastavení WiFly modulu jako AP, přičemž PC by se k němu připojovalo. To by ale vyžadovalo vyšší energetické nároky modulu a tak tato alternativa není využita.

3 NÁVRH A REALIZACE MĚŘÍCÍCH MODULŮ

Tato kapitola se zabývá elektronickým návrhem a výslednou realizací DPS (Deska Plošného Spoje). Během vývoje až doposud byly navrženy a vyrobeny 3 moduly, které zde budou, pro lepší orientaci v textu, nazývány jako "Test1", "Test2" a "Final". Kompletní schémata a výrobní podklady všech třech modulů lze nalézt v přílohách A, B a C.

3.1 Popis zapojení modulu Final

V této sekci je popsán elektronický návrh finální verze modulu Final, který zastupuje centrální i měřicí jednotku v jednom návrhu.

3.1.1 Zapojení napěťového regulátoru ADP3301

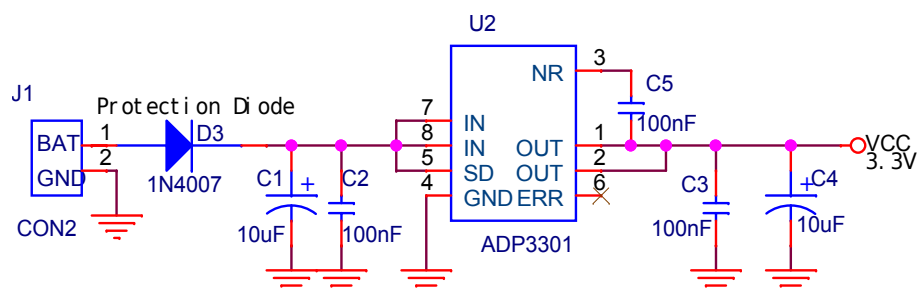
Důležitým faktorem ovlivňujícím zapojení celého obvodu je kvalita využitého napěťového stabilizátoru. Z toho důvodu byl vybrán integrovaný stabilizátor ADP3301[12] od firmy Analog Devices v pouzdře SOIC-8.

Jeho výhodou je především nízký dropout, tedy velmi malá hodnota úbytku napětí mezi vstupním a výstupním pinem, která typicky činí 100 mV a taktéž odebírá velmi nízký proud v klidovém stavu. Vyznačuje se nízkým šumovým prahem výstupu při zapojení filtrační kapacity (C5) na pin NR (Noise Reduction) a poskytuje další piny např. k vypnutí regulátoru (\overline{SD} - Shut Down) či indikaci odchylky regulace od požadovaných hodnot (ERR), které ale nejsou v práci využity. Stabilizátor funguje se vstupním napětím mezi 3 V až 12 V a výstupní napětí reguluje na 3,3 V s maximálním výstupním proudem 200mA.

Ke správné funkci integrovaných obvodů v modulu je třeba výstupního napětí regulátoru 3,3V. V zapojení na vstupu však figuruje i křemíková dioda 1N4007[20] použitá k ochraně proti přepólování, na které je úbytek napětí max. 1,1 V při průchodu proudu o hodnotě 1 A. Je tedy nutné na vstupní napájecí konektor J1 plošného spoje přivést napětí alespoň $3,3 \text{ V} + 0,1 \text{ V} + 1,1 \text{ V} = 4,5 \text{ V}$.

Ke správnému zapojení posloužil jako předloha příslušný dokument integrovaného obvodu. Kromě velikosti C5 jsou součástky vybrány dle dostupnosti v laboratoři ČVUT a jsou proto přibližně doporučené velikosti. Na vstupu i výstupu jsou vždy dva kondenzátory, jeden keramický o velikosti 100 nF a druhý elektrolytický

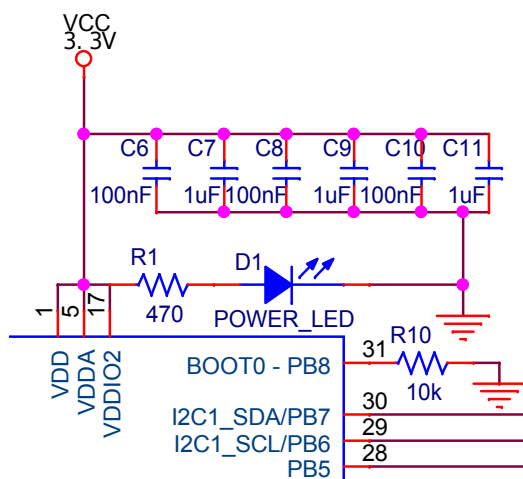
10 μF .



Obr. 3.1: Schématický návrh zapojení regulace napájení

3.1.2 Napájení MCU

Na obr. 3.2 je zobrazeno řešení blokování MCU, který k napájení využívá 3 piny VDD, VDDA sloužící k napájení digitální a analogové části a VDDIO2 pro nezávislé napájení osmi 5 V tolerantních I/O pinů (PA8 - PA15). Dva lokální blokovací¹ kondenzátory (100 nF a 1 μF) jsou vždy připojeny mezi příslušným napájecím pinem a zemí, VDD a VDDIO2 co nejbližně dvěma pinům VSS. K detekci funkce napájení je navíc přes odpor 470 Ω připojena LED dioda (D1) červené barvy.



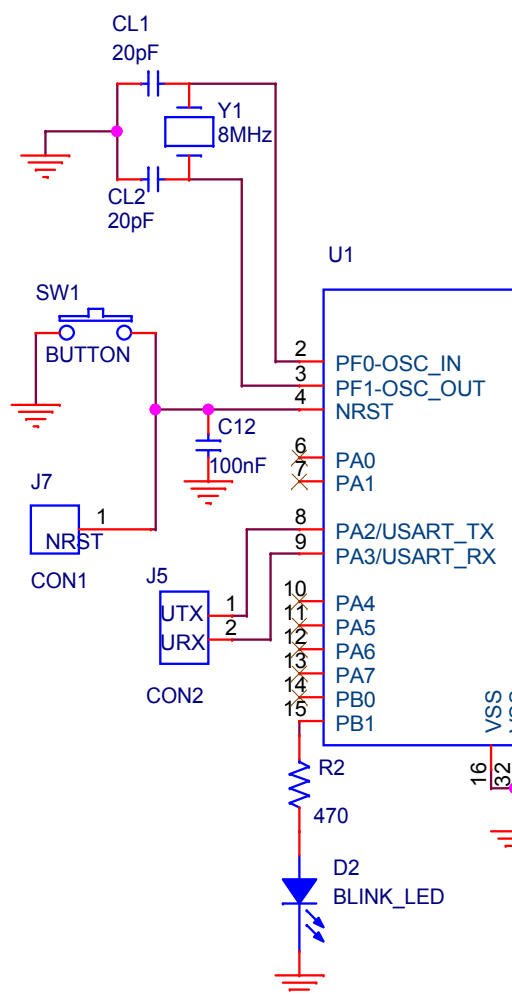
Obr. 3.2: Schéma zapojení blokování napájení MCU

¹Kvůli impulzní spotřebě součástek a zpoždění proudu při průchodu DPS jsou zapotřebí lokální zdroje energie.

3.1.3 Zapojení a vyvedení pinů MCU

Mikrokontrolér STM32F042K6 je použit v 32-pinovém pouzdře LQFP32 s třemi vyvedenými piny pro napájení, dvěma pro připojení na zem, dvěma vyhrazenými pro oscilátor, jedním k výběru možnosti nahrávání programu do vnitřní paměti Flash (BOOT0), jedním pro reset tlačítko a zbylými třiatřiceti vstupně-výstupními GPIO (General Purpose Input/Output) branami.

Levá část schématu MCU na obr. 3.3 zachycuje zapojení externího oscilátoru, LED diody a vyvedení pinů sériové linky USART a NRST na konektory.

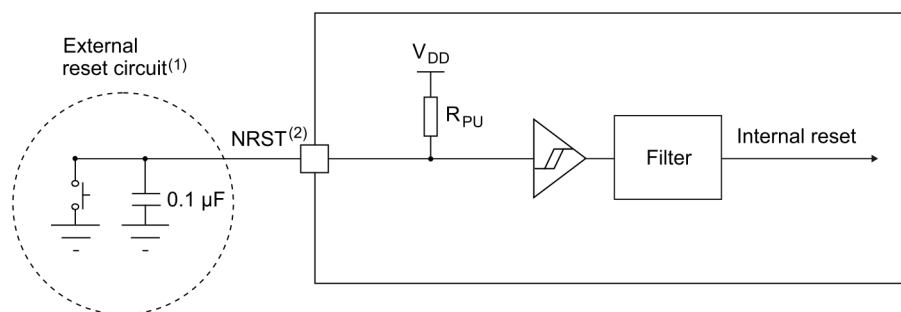


Obr. 3.3: Zapojení levé části schématu MCU

Všechny mikrokontroléry rodiny STM32 sice obsahují vlastní oscilátor velikosti 8 MHz, nejsou však příliš přesné a frekvence se u nich mění s teplotou okolního pouzdra čipu. Pro potřeby synchronizace více zařízení či přesného časování bitů protokolu

CAN je zahrnutí přesného externího oscilátoru pro správnou funkci systému rozhodující. S keramickým oscilátorem o velikosti 8 MHz jsou v paralelní kombinaci použity kondenzátory CL1 a CL2 o 20 pF.

Na pin NRST mikrokontroléru je připojeno reset tlačítko (SW1), které po stisku propojí pin se zemí a uvede tak MCU do výchozího stavu. MCU poté začne vykonávat kód programu od jeho počátku. K reset tlačítku je paralelně připojen kondenzátor velikosti 100 nF a chrání tak zařízení proti parazitnímu resetu. MCU obsahuje vnitřní pull-up rezistor a není již potřeba externího rezistoru, jak je vidět na obr. 3.4. Pin NRST je pro případnou potřebu vyveden na konektor J7.



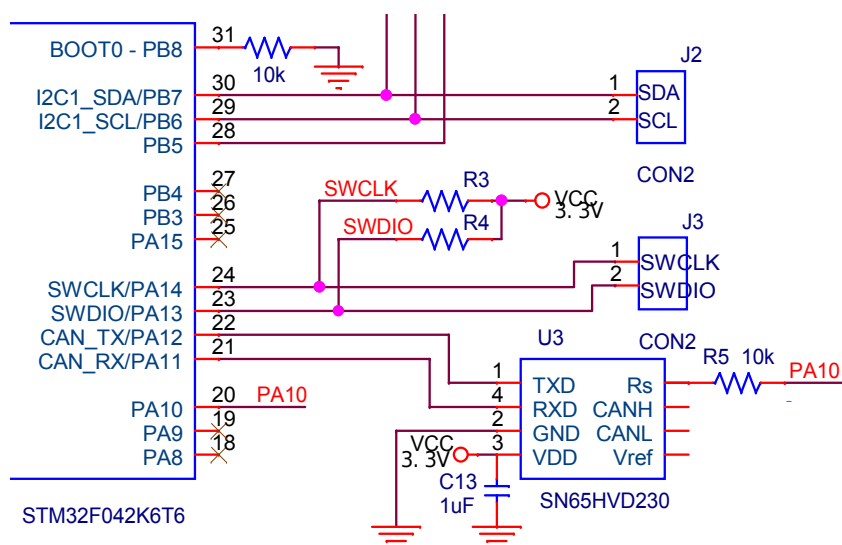
Obr. 3.4: Doporučené zapojení NRST spolu s vnitřním zapojením

Dva piny komunikačního rozhraní USART jsou vyvedeny přímo na konektory modulu. MCU obsahuje vlastní interní pull-up rezistory a je tedy výhodou, že tato komunikační sběrnice nevyžaduje připojení žádných dalších externích součástek. USART je na plošném spoji vyveden proto, aby DPS mohla být použita v roli jak měřicí jednotky, tak jednotky centrální.

V levé spodní části je pak vidět připojení LED diody na pin PB1 s předřazeným odporem o velikosti 470 Ω . Ta vývojáři poskytuje možnost jednoduchého ladění programu v podobě blikání.

Pravá část schématu MCU na obr. 3.5 zachycuje zapojení pinu BOOT0 (PB8), I/O pinů periférií I2C (PB6, PB7), SWD (PA13, PA14), CAN (PA11, PA12) a pinu PA10.

Bootovací pin BOOT0 je používán pro výběr způsobu nahrávání programu do paměti Flash. Jedním z nich je nahrávání za pomoci SWD rozhraní a k tomu je třeba takového zapojení pinu, aby na jeho vstupu byla logická úroveň 0. To zaručí



Obr. 3.5: Zapojení pravé části schématu MCU

propojení pinu se zemí za použití odporu R10 o velikosti 10k Ω . Druhý způsob je popsán v podsekcí 3.2.2.

Vyvedené piny PB7 a PB8 jsou nastaveny k použití komunikačního protokolu I2C a jsou propojeny s příslušnými oběma piny SDA a SCL obou MEMS senzorů. Fyzická realizace sběrnice dle standardu musí implementovat dva pull-up rezistory na obou linkách (viz. obr. 2.13), které na kompletním schématu v příloze XX znázorňují odpory R7 a R8 o velikostech 4,7 k Ω . Jejich velikost se řídí požadovanou přenosovou rychlostí sběrnice. K vyšším rychlostem se velikost odporů zmenšuje do 2,2 k Ω , k vyšším naopak zvětšuje až k 10k Ω . Pro frekvenci přenosu dat 400 kHz se obvykle využívá velikost obou odporů 4,7 k Ω .

K nahrávání programu do vnitřní paměti Flash slouží dva piny, kterými jsou PA13 (SWDIO) a PA14 (SWCLK). Vodiče pinů jsou vyvedeny na konektor J3 modulu, aby k nim měl přístup externí ST-Link debugger.

Na tomto místě je třeba zmínit, že sériové ladící rozhraní SWD nebylo funkční bez externích pull-up rezistorů na linkách SWDIO a SWCLK. Mikrokontrolér by však na obou linkách měl realizovat vnitřní pull-up rezistory. Během vývoje návrhu DPS, jednak při osazení součástek do nepájivého pole a později i při zprovoznění navrženého testovacího modulu, byla potřeba alespoň jeden z těchto pull-up rezistorů osadit. Záměrně u těchto odporů není uvedena velikost, jelikož se rezistory použité ke zprovoznění lišily.

Posledními třemi piny pravé části schématu MCU jsou piny patřící datové komunikační lince CAN. Pin PA12 je přiřazen lince CAN_TX, která je připojena k pinu TXD budiče CAN SN65HVD230. Druhý pin PA11 je pak propojen s pinem RXD.

Pro potřeby snižování proudového odběru mikrořadiče je využita vlastnost mikročipu MPU-9150. DMP mikročipu MPU-9150 má přístup k externímu pinu INT na kterém je schopno signalizovat přerušení. MPU-9150 je v této práci nakonfigurován tak, aby zdrojem přerušení byl akcelerometr. Pokud hodnoty výstupních dat akcelerometru překročí danou hranici jedním či druhým směrem, DMP vygeneruje přerušení na pin INT, který je propojen s pinem PB5 mikrořadiče. Příchozí hrana signálu na pinu PB5 tak indikuje přerušení od MPU-9150 znamenající, že se objekt přestal aktivně pohybovat nebo se hýbe velmi málo a tuto informaci předá pinu PA10, ke kterému je připojen pin Rs budiče sběrnice CAN. Pin PA10 mikrořadiče je tak následně použit k řízení přechodu integrovaného obvodu budiče CAN SN65HVD230 do nízkoenergetického standby modu ve chvíli, kdy monitorování pohybu není třeba.

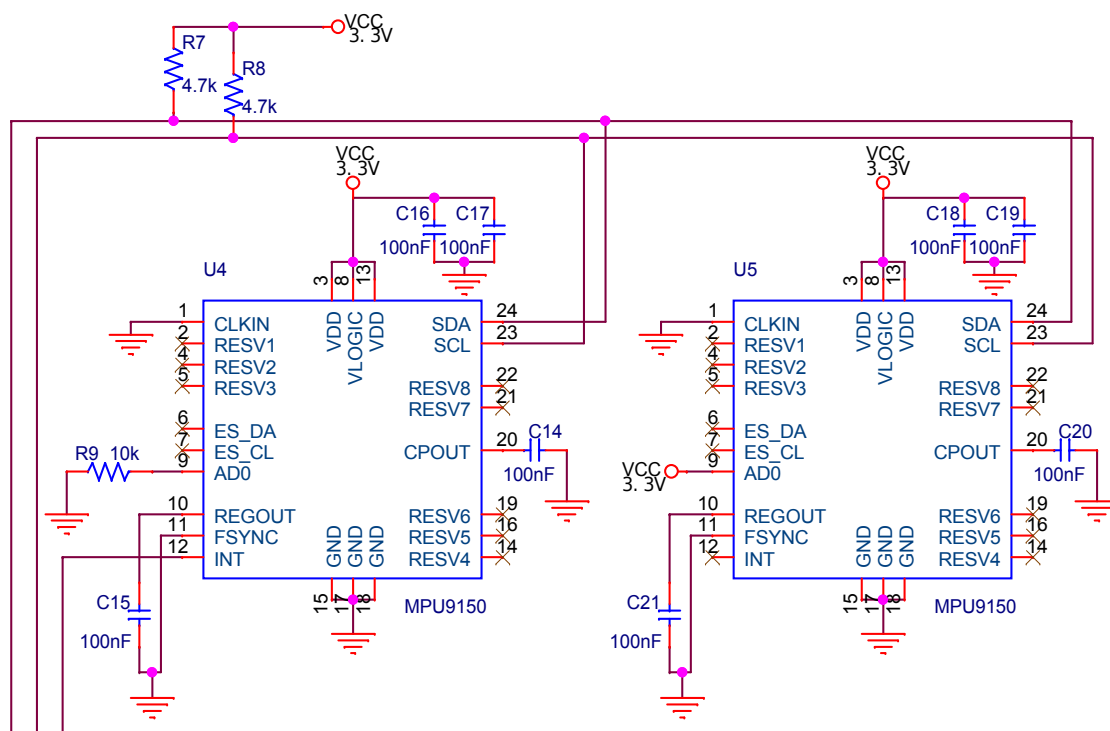
Zapojení sběrnice I2C a propojení PB5 pinu MCU s INT pinem MEMS senzoru je vyobrazeno na celkovém schématu v příloze A.

3.1.4 Zapojení MEMS senzorů

Zapojení obou dvou MEMS senzorů použitých ve finálním návrhu je stejné. Jedinou výjimkou je zapojení pinů INT použitých k signalizaci přerušení a pinu AD0, podle kterého se nastavuje 7-bitová adresa čipu, jež slouží k rozeznání obou zařízení.

První čip má pin AD0 připojen na zem přes odpor R9 a na jeho vstupu je tedy log.0 ($AD = 0$). Jeho adresa je tak tvořena posloupností bitů 1101000. Pin AD0 druhého MEMS je zapojen k napájení ($AD = 1$) a jeho adresa je tak 1101001. Podle výše popsaného je zřejmé, že logická úroveň na vstupu pinu AD0 mění poslední bit adresy čipu.

Pin INT je propojen s pinem MCU a to pouze u mikročipu U4. Protože při stejné konfiguraci mikročipů MPU-9150 musí oba posílat přerušení ve stejný okamžik, je zbytečné propojovat tento pin i druhého MEMS (U5) s MCU. Jediným omezením je fakt, že pro požadovanou funkci snižování proudového odběru za pomoci pinu INT a zároveň vyřazení MEMS bude muset být vždy vypnut MEMS U5. Důvod zapojení INT - PB5 je popsán na konci podsekcce 3.1.3.



Obr. 3.6: Schéma zapojení senzorů MEMS

Protože není použit externí zdroj hodinového signálu, je pin CLKIN zapojen k zemi. V návrhu nechybí ani blokovací kondenzátory napájecích pinů VLOGIC (8) a VDD (13). Zapojení dalších pinů, jako jsou nábojová pumpa CPOUT, REGOUT a FSYNC se řídí dle příslušné dokumentace [8]. Jak je ze schématu možno vidět, všechny kondenzátory jsou velikosti 100 nF. Obě dvě komunikační linky sběrnice I2C zahrnují dva pull-up rezistory velikostí 4,7 k Ω pro rychlost přenosu 400 kHz.

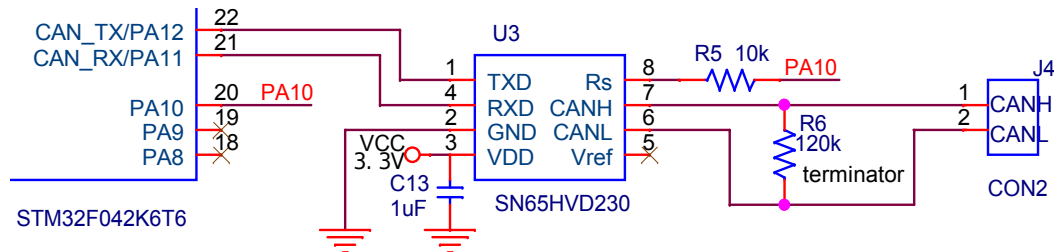
3.1.5 Zapojení budiče CAN

Zapojení budiče CAN je vizualizováno obrázkem 3.7 a k jeho realizaci posloužil dokument [13].

Zařízení je plně kompatibilní s požadavky standardu ISO 11898, dovoluje použití maximální přenosové rychlosti 1Mb/s a vyznačuje se velmi nízkým proudovým odběrem ve sleep módu 0,1 μ A.

Obvod je zasazen do pouzdra SOIC-8 a má tedy vyvedených 8 pinů. Obsahuje piny pro dvě datové linky TXD, RXD spojené s piny MCU PA12, PA11 (CAN_TX, CAN_RX), pin pro napájení VDD blokováný kondenzátorem C13 a zem GND.

Dalšími piny integrovaného obvodu pak jsou CANH a CANL pro připojení fyzické sběrnice CAN a pin Rs pro řízení slope-control a přechodu zařízení do sleep módu. Pin Vref poskytuje referenci poloviny napájecího napětí VDD/2 a není v práci nijak použit.



Obr. 3.7: Schéma zapojení budiče CAN

Pin Rs je propojen s pinem MCU, které je tak schopno řídit přechod budiče do nízkoenergetického módu. Nabízí dva módy funkce: high-speed a low-power (sleep mode). Pro výběr high-speed módu je třeba připojení pinu na zem, v tomto případě přivedení log.0 na jeho vstup. Low-power módu je naopak dosaženo přivedením log.1. Dle katalogového listu je třeba k řízení sklonu hrany signálu (slope-control) zapojit mezi oba piny Rs - PA10 odpor o velikosti mezi 10 k Ω k dosažení až 15 V/ μ s a 100 k Ω pro nižší rychlost přechodu úrovně signálu 2 V/ μ s.

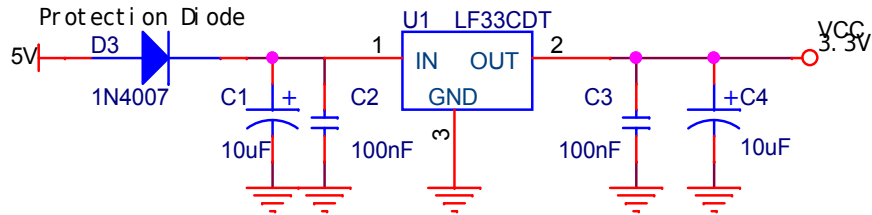
V návrhu je také zahrnut zakončovací rezistor R6 o velikosti 120 k Ω (terminátor) sběrnice CAN (viz. obr. 2.8). Ten bude osazen pouze u dvou jednotek, které tak vytvoří zakončení sběrnice dle standardu ISO 11898. Oba vodiče CANL a CANH jsou v paralelní kombinaci s rezistorem R6 a jsou vyvedeny na konektor J4.

3.2 Popis zapojení testovacího modulu Test1

Tato sekce se zabývá elektronickým návrhem testovacího modulu Test1 a bude probírána ve stručnosti, jelikož se v mnoha aspektech shoduje s navrženou finální verzí modulu Final. Modul Test1 zahrnuje jeden MEMS senzor a veškerou potřebnou integraci součástek k samostatné funkci. MCU tohoto testovacího modulu Test1 má vyvedeny všechny piny na konektory, aby byla případně možnost prozkoušet více variant komunikace za pomoci různých komunikačních rozhraní. Po propojení s modulem Test2 vznikne kompletní měřicí jednotka IMU (s oběma MEMS senzory).

3.2.1 Zapojení napěťového regulátoru LF33CDT

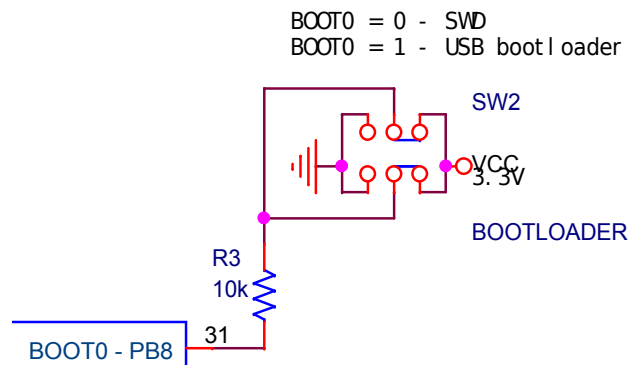
V testovacím modulu Test1 byl použit regulátor napětí LF33CDT [7], u kterého je zapojení oproti zařízení ADP3301 jednodušší. Postačily 3 piny IN, OUT a zem GND. Návrh taktéž obsahuje 4 filtrační kondenzátory a diodu (D3), která obvod chrání proti přepólování.



Obr. 3.8: Schéma zapojení napěťového regulátoru LF33CDT

3.2.2 Zapojení USB konektoru a přepínače

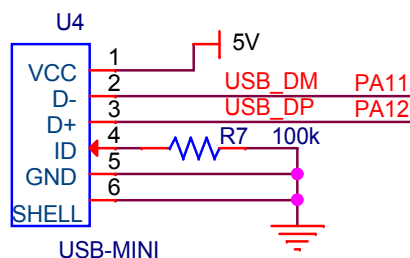
Pro možnost nahrávání programu do vnitřní paměti Flash oběma způsoby (za pomoci SWD i USB) byla potřeba do návrhu začlenit přepínač (SW2). Tento přepínač je připojen k pinu BOOT0 (PB8). Je-li na pin BOOT0 přivedena log.0, lze nahrávat program za pomoci SWD. Přepnutím přepínače do druhé polohy je na pin BOOT0 přivedena log.1 a tak lze program nahrát pomocí USB zavaděče² neboli bootloaderu.



Obr. 3.9: Připojení přepínače k MCU

²Zavaděč je výrobcem naprogramovaný neměnitelný kód součástí jádra MCU.

Na obr. 3.10 je vidět zapojení konektoru USB-Mini (U4). Ten může posloužit k napájení celého obvodu testovacího modulu Test1. Pin č. 1 USB konektoru po propojení s počítačem poskytuje napětí 5 V. Dále pak USB-Mini spolu s PC aplikací DfuSe od firmy ST a zavaděčem MCU slouží k nahrávání firmwaru do vnitřní paměti Flash a lze jím taktéž ověřovat naměřená výpisem na PC terminál.



Obr. 3.10: Zapojení USB-Mini konektoru

3.3 Zapojení testovacího modulu Test2

Druhý testovací modul Test2 obsahuje pouze MEMS senzor s vyvedenými potřebnými piny na konektory k možnosti propojení obou modulů Test1 a Test2. Mikročip MPU-9150 má vyvedeny piny I2C (SCL, SDA), přídatné I2C (ES_CL, AS_DA), INT, GND a VDD (3.3 V) na 7-pinový header. Součástí je také propojka pro možnost změny adresy mikročipu MPU-9150 a potřebné součástky ke správné funkci MPU-9150. Schéma testovacího modulu Test2 je součástí přílohy C.4.

3.4 Desky plošných spojů

Navržené DPS (Deska Plošného Spoje) byly realizovány za pomoci softwaru OrCAD (schématický návrh) a Allegro PCB od společnosti Cadence³. Hlavním důvodem výběru těchto programů byly jejich rozsáhlé možnosti editace a nastavení parametrů návrhu. Nabízí např. možnost definování velikostí pouzder součástek a prohlížení navržené DPS v trojrozměrném zobrazení, což nabízí rychlejší orientaci v komplexnějších návrzích. Lze tedy konstatovat, že znalost tohoto softwaru přináší jisté výhody a zvyšuje kvalitu návrhu.

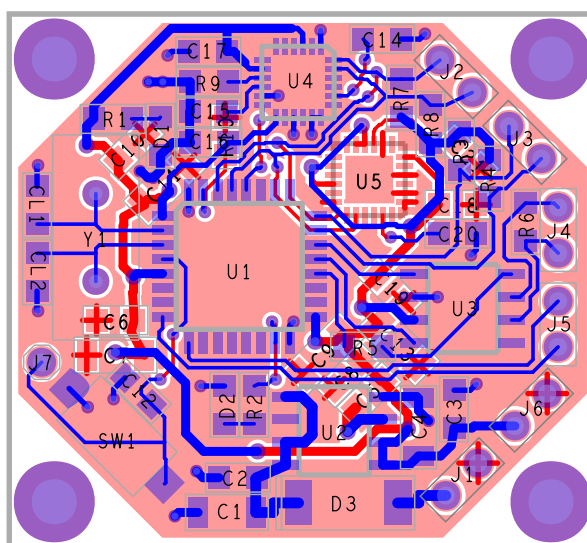
³Podrobnější informace k produktům společnosti Cadence lze nalézt na jejich stránkách www.cadence.com

V laboratoři ČVUT byly k dispozici součástky rezistorů a kondenzátorů fyzických velikostí 0805 a 1206 a tak všechny vytvořené moduly jsou navrženy k osazení součástkami těchto specifikací. Pro kondenzátory velikostí 20 pF a 100 nF, rezistory všech velikostí a LED diody je použit footprint⁴ pouzdra 0805. Kondenzátory 10 μF a 1 μF jsou pak v pouzdech 1206.

Všechny DPS jsou realizovány na dvouvrstevném plošném spoji. Spodní vrstva vždy z větší části tvoří zem v podobě rozlité mědi. Vyobrazení obou vrstev DPS je v této kapitole vždy z pohledu shora (kromě osazovacího plánu). V přílohách jsou pak vrstvy zobrazeny dle příslušné strany.

3.4.1 DPS modulu Final

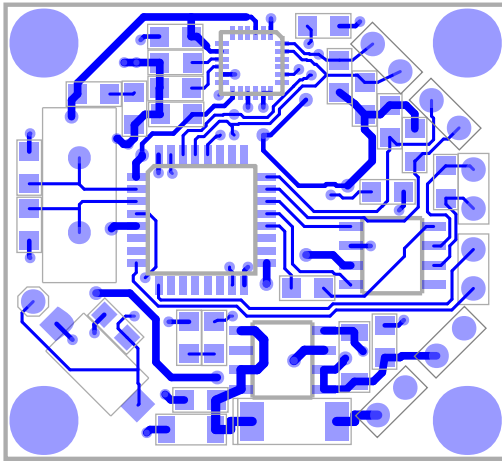
Základním požadavkem navrhované finální verze DPS byla co nejmenší velikost. Z toho důvodu nemají součástky kolem sebe mnoho prostoru a několik z nich je osazeno na druhou stranu plošného spoje. Velikost DPS činí 32,6 mm x 29,6 mm.



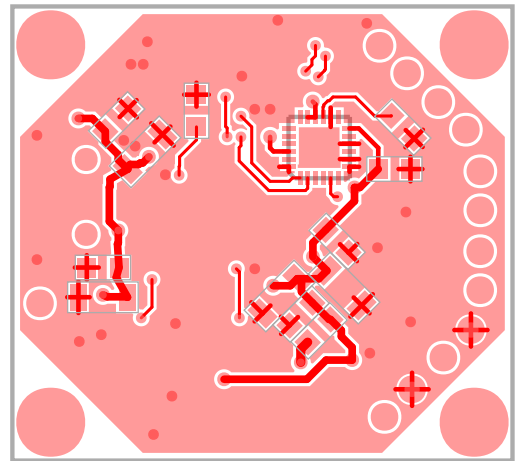
Obr. 3.11: Výsledná realizace DPS Final

Celý návrh DPS je možno vidět na obr. 3.11. Červenou barvou je vykreslena spodní vrstva, která tvoří zem a modrou vrstva vrchní. Pohled na vrchní vrstvu nabízí obr. 3.12, na spodní pak obr. 3.13.

⁴ Anglické označení pro návrh pájecích plošek v DPS, na které jsou součástky osazeny. Volně lze přeložit jako "stopa".

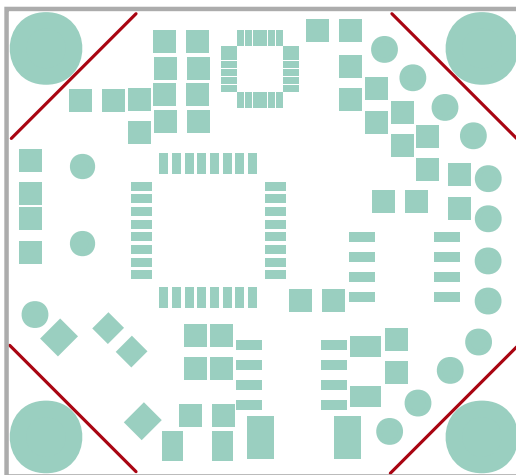


Obr. 3.12: Vrchní vrstva DPS Final

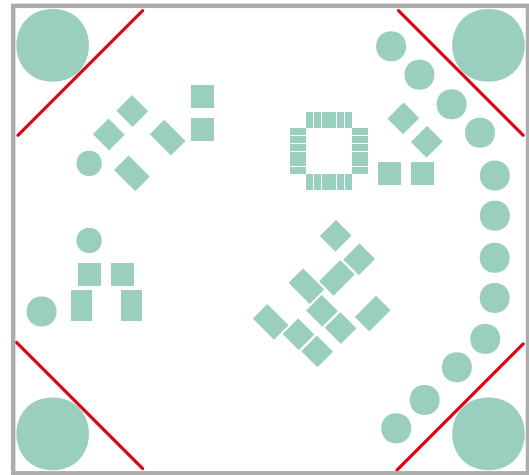


Obr. 3.13: Spodní vrstva DPS Final

Ke správné funkci obvodu a omezení nežádoucích jevů je rozvod kladného napájecího napětí v obou vrstvách DPS zajištěn širšími spoji, užší spoje pak zajišťují přenos komunikačních a dalších funkčních signálů.



Obr. 3.14: Vrchní vrstva DPS Final

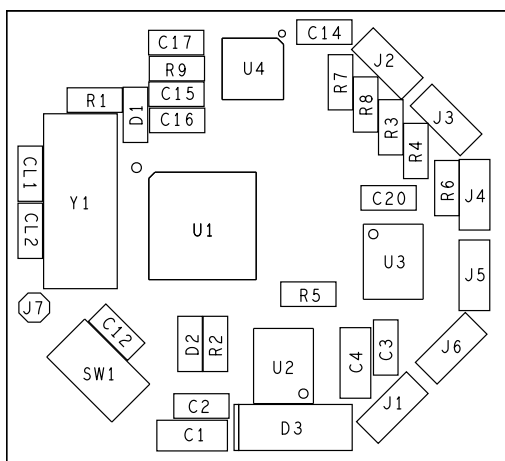


Obr. 3.15: Spodní vrstva DPS Final

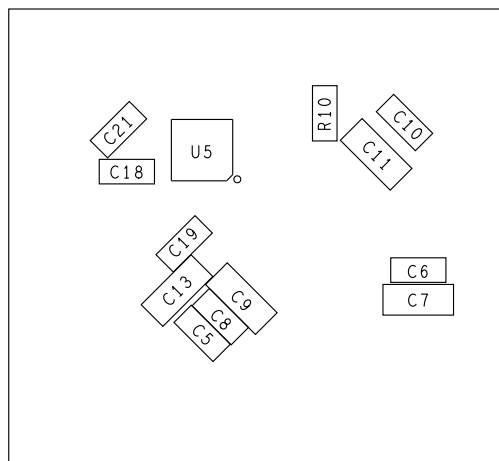
V návrhu si lze všimnout rohových děr, které slouží k pevnému uchycení modulu. Během procesu návrhu DPS ale nebylo zcela jasné, jakým způsobem bude modul připevněn a proto je měď rozlita do tvaru osmiúhelníku, aby byla v případě potřeby možnost odříznutí rohových děr, které by jinak zbytečně zabíraly místo. K uchycení modulu může posloužit šroubek o průměru 2,5 mm, na který jsou navrženy díry di-

menzovány. Pro přesné odříznutí děr byla do nepájivé masky⁵ vepsána z obou stran DPS čára (červeně) jak je možno vidět na obr. 3.14 a 3.15

Součástky jsou popsány z pohledu shora a tvoří několik skupin. Po pravé straně jsou vyvedeny všechny potřebné periferie a napájecí piny na konektory. Spodní dva konektory J1 a J6 jsou použity pro napájení 5 V a 3,3 V, zbylé čtyři J2 (I2C), J3 (SWD), J4 (CAN), J5 (USART) jsou poskytnuty komunikačním rozhraním. Ve spodní části návrhu DPS je možno vidět regulátor napětí U2 a ochrannou diodu D3 obklopenou filtračními kondenzátory. Levou stranu okupuje především MCU s krystalem a reset tlačítkem. Všechny filtrační kondenzátory MCU jsou navrženy k osazení na druhou stranu DPS, aby se uvolnilo místo krystalu a mohly tak být dodrženy stejné délky obou vedení mezi piny krystalu a piny MCU PF0 a PF1. Pravá část je osazena CAN budičem U3 a jeho součástkami R5, R6 a C13. Poslední horní část je vymezena oběma MEMS sensorům a jejich součástkám (viz. 3.1.4). Na DPS jsou oba senzory osazeny naproti sobě, jak je popsáno v podsekcí 2.2.2 a jsou mírně posunuty tak, aby nedocházelo k jejich vzájemnému elmag. rušení. Z obrázků DPS je patrné, že vedení vodičů a osazení součástek pod jednotlivými čipy je ve druhé vrstvě celkově minimalizováno. Modul pak zahrnuje i 2 LED diody použité pro indikaci napájení (D1) a možnost jednoduchého ladění programu (D2). Osazovací plán součástek je zobrazen na obr. 3.16 a 3.17.



Obr. 3.16: Osazovací plán horní vrstvy DPS Final

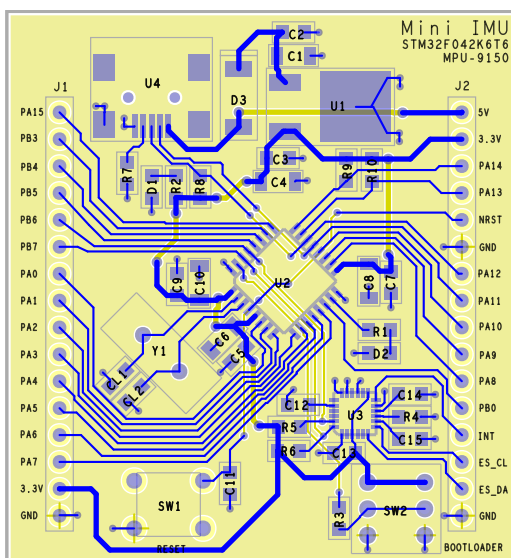


Obr. 3.17: Osazovací plán spodní vrstvy DPS Final

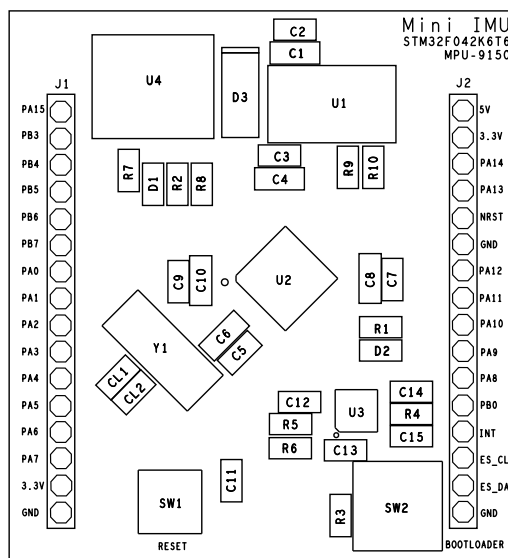
⁵V anglické literatuře označováno jako "soldermask".

3.4.2 DPS testovacího modulu Test1

Hlavním požadavkem na testovací modul Test1 byla možnost využití všech vyvedených pinů pouzdra a nahrávání programu do MCU za pomoci obou rozhraní SWD a USB (viz. 3.2.2). Velikost navrženého modulu nebyla nijak omezena (48.1 mm x 52.1 mm) a proto je součástkám dán prostor a jsou všechny osazeny na vrchní stranu DPS. To přispělo k její správné funkci. Obr. 3.18 ukazuje kompletní návrh DPS, na další straně jsou pak obr. 3.20 a 3.21, které zobrazují zvláště obě vrstvy. Tabulka 3.1 znázorňuje rozložení vyvedených pinů MCU na konektory.

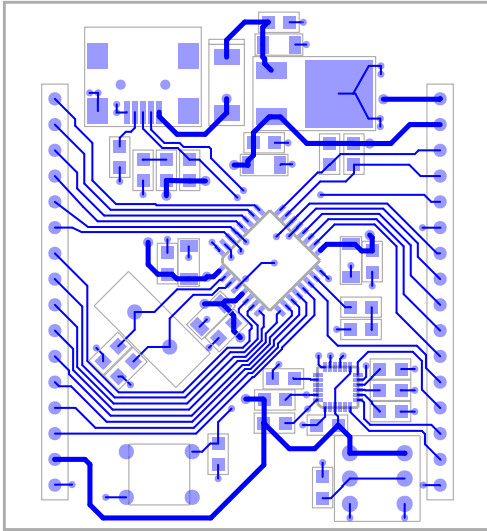


Obr. 3.18: Výsledná realizace DPS Test1

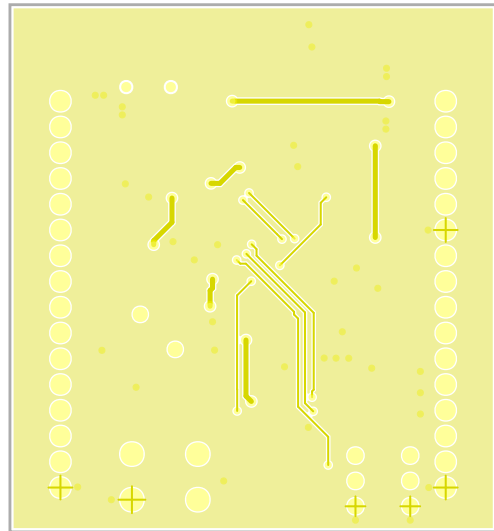


Obr. 3.19: Osazovací plán horní vrstvy DPS Test1

Osazení součástek je vidět na osazovacím plánu 3.19. Po obou stranách modulu jsou vyvedeny piny MCU a v pravé dolní části pak některé piny MEMS senzoru MPU-9150 (INT, ES_CL, ES_DA) na konektory J1 a J2. Prostor středu DPS okupuje MCU (U2) a součástky důležité pro jeho funkci (C5 - C10) (viz. 3.1.2) spolu s externím oscilátorem a kondenzátory CL1 a CL2. Vrchní část je pak určena především USB konektorem U4 a napěťovému regulátoru U1 a jeho filtračním součástkám spolu s protékací diodou D3. Spodní část je pak vyhrazena MEMS senzoru (U3) a jeho součástkám, pull-up rezistorům pro I2C, reset tlačítku SW1 a přepínači SW2, který poskytuje obě možnosti nahrávání programu do MCU (viz. 3.2.2). Návrh modulu obsahuje i 2 LED diody použité pro indikaci napájení (D1) a možnost jednoduchého ladění programu (D2).



Obr. 3.20: Vrchní vrstva DPS Test1



Obr. 3.21: Spodní vrstva DPS Test1

Číslo pinu	1	2	3	4	5	6	7	8
Kon. J1	PA15	PB3	PB4	PB5	PB6	PB7	PA0	PA1
Kon. J2	5 V	3,3 V	PA14	PA13	NRST	GND	PA12	PA11

Číslo pinu	9	10	11	12	13	14	15	16
Kon. J1	PA2	PA3	PA4	PA5	PA6	PA7	3,3 V	GND
Kon. J2	PA10	PA9	PA8	PB0	INT	ES_CL	ES_DA	GND

Tab. 3.1: Rozmístění pinů konektorů J1 a J2 na DPS Test1

3.4.3 DPS testovacího modulu Test2

Druhý testovací modul Test2 o velikosti 18.1 mm x 22.1 mm je tvořena pouze zmíněným jedním MEMS senzorem (U5), u kterého jsou vyvedeny potřebné piny na konektor J3. Propojka J4 je použita pro změnu adresy čipu jak je popsáno v 3.1.4. Celý návrh včetně výrobních podkladů, osazovacího plánu, schématu a seznamu součástek lze nalézt v příloze C

4 SOFTWARE

4.1 Vývojové prostředí μ Vision5 a firmware

K vývoji firmwaru pro centrální řídicí jednotku a jednotky IMU posloužilo vývojové prostředí Keil μ Vision5 [21]. Firma Keil Software poskytuje zdarma přístupné kódy pro toto vývojové prostředí, přesto však byly použity stejně tak volně dostupné firmwarové balíčky [3] od firmy STMicroelectronics a to z toho důvodu, že nabízejí kompletní definice registrů, periferií a mnoho užitečných funkcí.

K vytvoření funkčního firmwaru USB VCP pro testovací modul s MCU STM32F042 byl použit generátor kódu STM32CubeMX [4] [5] od firmy STMicroelectronics. Protože ale některé funkce, např. zápisu a čtení paměti Flash, nebyly zcela funkční a musely být doprogramovány, byly do projektu postupně přidávány již zmiňované zcela funkční firmware balíčky pro mikrokontroléry rodiny STM32F0xx.

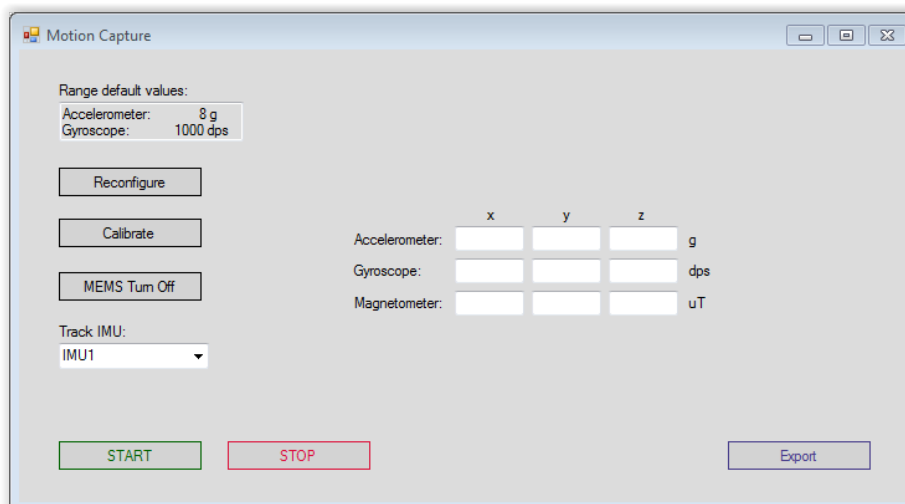
4.2 PC aplikace

K vytvoření PC aplikace posloužila volně dostupná verze vývojového prostředí Visual Studio a je psaná na platformě C# .NET. Programovací jazyk C# je velmi uživatelsky přívětivý, což vedlo k jeho výběru.

Obr. 4.1 zobrazuje vizuální provedení aplikace, kde v levé části je tlačítko "MEMS Turn Off", které slouží, jak název napovídá, k vypnutí druhého MEMS senzoru pro snižování proudového odběru systému. Tlačítko "Calibrate" pak v klidovém stavu systému odečte a uloží offsety os všech gyroskopů¹. Tlačítko "Reconfigure" obsahuje vyskakovací okno (viz. 4.2), které poskytuje možnost přenastavení rozsahů akcelerometrů a gyroskopů všech IMU jednotek. Rozbalovací seznam "Track IMU" nabízí výběr jednotky, u které chce uživatel v reálném čase vidět měřená data. Ta jsou zobrazována ve střední části aplikace, kde je možno vidět devět kolonek pro tři senzory s jejich třemi osami. Spodní tři tlačítka "START", "STOP" a "EXPORT" umožňují spouštět a zastavovat monitorování měření s následným exportem do souboru s příponou CSV (hodnoty oddělené čárkami - Comma-Separated Values). S tímto souborem lze pak dále například pracovat v programu MATLAB od firmy MathWorks®.

Důvod výběru právě tohoto typu souboru je fakt, že ho dokáží zpracovat i klasické tabulkové softwary, jako Excel od firmy Microsoft či Calc od OpenOffice a není

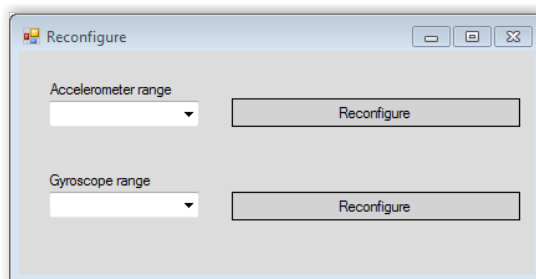
¹Offsety akcelerometrů se musí nastavit u jednotlivých IMU jednotek ručně.



Obr. 4.1: PC aplikace

pro něj třeba speciálních nebo volně nedostupných softwarů.

Všechna přijatá data PC aplikací (od IMU jednotek) jsou stále v surovém 16-bitovém tvaru. Proto je nutné, aby je aplikace, dle uživatelem odeslané žádosti ke konfiguraci rozsahů senzorů, vždy roznásobila příslušným koeficientem a převedla tak do požadovaných jednotek *dps* (gyroskop) a *g* (akcelerometr).



Obr. 4.2: Vyskakovací okno pro konfiguraci rozsahů senzorů

Magnetometr ve svých registrech obsahuje statickou hodnotu zesílení všech tří os a je jí třeba v aplikaci pro všechny magnetometry definovat. Původním záměrem bylo tuto funkci realizovat za pomoci tlačítka "Calibrate", které by po svém vyslání dotazu centrální jednotce dostalo zpět všechna zesílení magnetometrů, které by následně uložilo. Momentálně je však nutné je definovat v PC aplikaci ručně.

5 NAMĚŘENÉ HODNOTY SENZORŮ

Tato kapitola obsahuje naměřené hodnoty výstupních dat dvou osazených MEMS senzorů. Naměřeny byly hodnoty offsetů os jednotlivých senzorů a rozsahy, ve kterých se hodnoty pohybují v klidovém stavu senzorů (šum). Následující tabulka 5.1 ukazuje offsety os senzorů akcelerometru a gyroskopu při maximálním rozlišení (min.rozsah) a offset os elektronického magnetometru, který nabízí rozlišení $0,3 \mu\text{T}/\text{digit}$.

	Akcelerometr [g] (0,061 mg/digit)			Gyroskop [dps] (0,0076 dps/digit)			Magnetometr [μT] (0,3 $\mu\text{T}/\text{digit}$)		
	Osa	x	y	z	x	y	z	x	y
MEMS1	0,005	0,001	0,110	0,044	0,032	0,020	0,5	10,62	18,10
MEMS2	0,050	0,023	0,030	0,039	0,014	0,153	4,00	0,63	28,10

Tab. 5.1: Naměřené hodnoty offsetů senzorů

Tabulky 5.2, 5.3 a 5.4 zobrazují rozsahy, ve kterých se hodnoty dat senzorů pohybují v klidovém stavu modulu a znázorňují tak šum senzorů. Hodnoty v tabulce jsou vždy *max. naměřený rozsah šumu/průměrná hodnota šumu*.

max./prům.	Akcelerometr [g] (0.061 mg/digit)		
Osa	x	y	z
MEMS1	0,002/0,001	0,002/0,001	0,002/0,001
MEMS2	0,004/0,002	0,003/0,001	0,003/0,001

Tab. 5.2: Naměřené hodnoty hladiny šumu akcelerometru

max./prům.	Gyroskop [dps] (0.0076 dps/digit)		
Osa	x	y	z
MEMS1	0,044/0,020	0,048/0,025	0,041/0,028
MEMS2	0,099/0,045	0,063/0,032	0,054/0,009

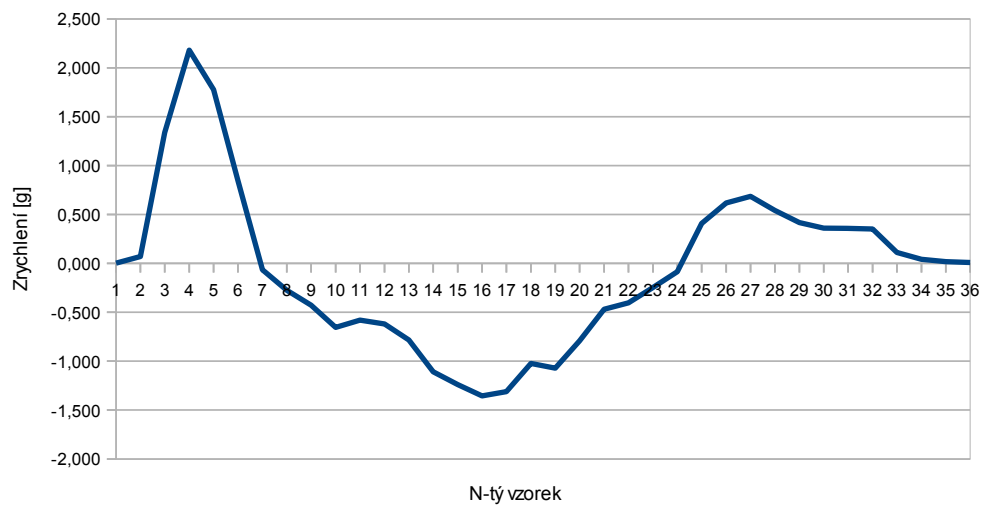
Tab. 5.3: Naměřené hodnoty hladiny šumu gyroskopu

S délkou doby snímání pohybu dochází u senzorů k akumulaci chyb. Byla proto na malém vzorku dat otestována funkčnost jedné z os akcelerometru jednoho ze dvou osazených MEMS senzorů. Následující graf 5.1 znázorňuje naměřená data z tabulky 5.5. Byl manuálně vykonán vertikální pohyb z bodu A do bodu B a zpět.

max./prům.	Magnetometr [μT] ($0.3 \mu\text{T}/\text{digit}$)		
Osa	x	y	z
MEMS1	1,832/0,723	1,020/0,442	1,230/0,699
MEMS2	3,100/1,240	3,812/1,954	3,181/1,304

Tab. 5.4: Naměřené hodnoty hladiny šumu magnetometru

Dvojitou integrací zrychlení ve vybraném časovém okamžiku byla určena okamžitá poloha. Součet poloh posledního sloupce tabulky zobrazuje absolutní posun naměřených dat od dat reálných, který činí 7 cm. Na konci grafu je vidět jakýsi nečekaný překmit mezi 24.a 36.vzorkem.



Obr. 5.1: Graf naměřených dat osy akcelerometru při testovacím pohybu

Vzorek	Čas t [s]	Zrychlení a [g]	Rychlost v [m.s ⁻¹]	Poloha s [m]
1	0,010	0,003	0,00000	0,00000
2	0,020	0,070	0,00140	0,00003
3	0,030	1,338	0,04014	0,00120
4	0,040	2,180	0,08720	0,00349
5	0,050	1,777	0,08885	0,00444
6	0,060	0,848	0,05088	0,00305
7	0,070	-0,065	-0,00455	-0,00175
8	0,080	-0,274	-0,02192	-0,00175
9	0,090	-0,427	-0,03843	-0,00346
10	0,100	-0,655	-0,06550	-0,00655
11	0,110	-0,579	-0,06369	-0,00701
12	0,120	-0,618	-0,07416	-0,00890
13	0,130	-0,784	-0,10192	-0,01325
14	0,140	-1,109	-0,15526	-0,02174
15	0,150	-1,239	-0,18585	-0,02788
16	0,160	-1,354	-0,21664	-0,03466
17	0,170	-1,312	-0,22304	-0,03792
18	0,180	-1,023	-0,18414	-0,03315
19	0,190	-1,071	-0,20349	-0,03866
20	0,200	-0,791	-0,15820	-0,03164
21	0,210	-0,470	-0,09870	-0,02073
22	0,220	-0,404	-0,08888	-0,01955
23	0,230	-0,245	-0,05635	-0,01296
24	0,240	-0,084	-0,02016	-0,00484
25	0,250	0,409	0,10225	0,02556
26	0,260	0,619	0,16094	0,04184
27	0,270	0,685	0,18495	0,04249
28	0,280	0,542	0,15176	0,04249
29	0,290	0,418	0,12122	0,03515
30	0,300	0,360	0,10800	0,03240
31	0,310	0,353	0,10943	0,03392
32	0,320	0,352	0,11264	0,03604
33	0,330	0,112	0,03696	0,01220
34	0,340	0,042	0,01428	0,00486
35	0,350	0,019	0,00665	0,00233
36	0,360	0,009	0,00324	0,00117
Suma:	—	—	—	0,07

Tab. 5.5: Hodnoty osy akcelerometru naměřené rychlým pohybem z bodu A do bodu B a zpět

6 ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo navrhnout a realizovat systém sběru dat pro měření pohybu člověka. Bylo třeba navrhnout jednotlivé měřící moduly a jeden modul centrální, který je použit k obsluze měřících modulů. Funkce všech těchto modulů je založena na 32-bitovém mikrokontroléru ARM s jádrem Cortex-M0. Podmínkou realizace systému bylo použití následujících součástek a komunikačních rozhraní:

- Mikroprocesor ARM s jádrem Cortex-M0.
- Dva MEMS senzory MPU-9150.
- Realizace komunikace centrální jednotky s měřícími jednotkami za pomoci CAN nebo SPI.
- Komunikace měřícího systému s PC za pomoci Wi-Fi sítě.

Dále pak bylo zadáním definováno:

- Navrhnout, nechat vyrobit a osadit DPS měřících jednotek i centrální jednotky.
- Vytvořit potřebné programové vybavení měřících jednotek i centrální jednotky.
- Vytvořit programové vybavení nadřazeného PC.
- Ověřit způsob přenosu dat z měřících modulů do modulu centrálního.

Ke splnění prvního bodu byl po analýze velikostí pouzder, vyvedených pinů a energetických požadavků mikrořadičů vybrán mikrokontrolér STM32F042K6T6 s jádrem ARM Cortex-M0, který poskytuje potřebná komunikační rozhraní k realizaci celého systému. V zadání je navrhován mikrokontrolér STM32L0x, ale ten nebyl nakonec využit, protože nenabízí požadované komunikační rozhraní protokolu CAN. Podle druhého bodu pak byly v systému navrženy dva MEMS senzory MPU-9150, které poslouží ke kompenzaci elmag. rušení. Samotný výčet dat z MEMS senzorů poskytuje sériové rozhraní I2C.

Třetí bod sice v zadání není explicitně vyjádřen, k dosažení požadavků však nebylo jiné možnosti, než použít jedno ze dvou komunikačních rozhraní CAN nebo SPI. Po analýze obou komunikačních protokolů byla k přenosu dat mezi centrálním uzlem a měřícími jednotkami využita sériová komunikační sběrnice CAN. K realizaci komunikace samotného měřícího systému s PC byl využit Wi-Fi modul Wi-Fly GSX RN-131 a komunikační protokol TCP.

Na počátku vývoje bylo navrženo schéma zapojení měřící jednotky IMU. Toto zapojení bylo otestováno se senzorem nižší verze MPU-6050 (bez el. magnetometru)

na nepájivém poli a až poté byly navrženy dvě dvouvrstvé desky plošných spojů ("Test1" a "Test2") určené k testovacím účelům. Po vyrobení obou DPS firmou PragoBoard s.r.o jsem následně obě DPS osadil a oživil. Propojením obou modulů tak vznikla měřicí jednotka IMU, pro kterou jsem vyvinul funkční programové vybavení k výčtu změřených hodnot z MEMS senzorů za pomoci I2C a zprovoznil komunikaci IMU s centrální jednotkou po sběrnici CAN.

Jako centrální jednotka k testovacím účelům posloužil STM32F072-Discovery kit, pro který jsem rovněž vyvinul funkční firmware a kit je tak schopen přijatá data posílat po VCP do PC i po komunikačním rozhraní UART modulu Wi-Fi. Modul Wi-Fi je pak nakonfigurován ke správné komunikaci za pomoci komunikačního protokolu TCP.

PC aplikace je napsána v jazyku C#, které programátorovi poskytuje uživatelsky přívětivé prostředí k práci se síťovými prostředky. Aplikace je schopna naměřená data přijímat a exportovat do datového souboru s příponou CSV a pomocí speciálních tlačítek vyslat požadované instrukce ke konfiguraci jednotek IMU.

Na konci vývoje byla navržena výsledná deska plošného spoje ("Final"), která by měla posloužit jako centrální i měřicí jednotka. Bylo vyrobeno 9 DPS, ale už nemohly být kompletně osazeny, jelikož objednané budiče sběrnice CAN ani měsíc po zadání objednávky nepřišly a na katedře měření se dle mně dostupných informací ani podobný typ budiče CAN nenacházel. Z toho důvodu nemohl být ověřen kompletní návrh systému.

K ověření správnosti výstupních dat byla naměřena data obou osazených MEMS senzorů. V tabulkách naměřených hodnot si lze všimnout, že některé osy magnetometrů mají nezanedbatelné offsety. Tyto offsety mohou být zapříčiněny nedodržením teplotních profilů při pájení horkým vzduchem a proto je nutné pro další osazování MEMS senzorů MPU-9150 na finální DPS ("Final") dodržet s maximální přesností teplotní parametry udané výrobcem.

Během vývoje systému jsem se naučil novým dovednostem a rozšířil obzor svých znalostí. Problematikou snímání pohybu objektu bych se do budoucna rád dále zabýval, protože mi přijde v mnoha profesních oborech zajímavá a užitečná i pro vývoj jiných systémů.

LITERATURA

- [1] ST Microelectronics. *STM32F042x: ARM®-based 32-bit MCU*. 2014, DocID025832 Rev 2.
- [2] ST Microelectronics. *RM0091 Reference manual: STM32F0x1/STM32F0x2/STM32F0x8 advanced ARM-based 32-bit MCUs*. 2014, DocID018940 Rev 6.
- [3] ST Microelectronics. *STSW-STM32048: STM32F0xx Standard Peripherals library*. 2014, DocID026094 Rev 1.
- [4] ST Microelectronics. *STM32CubeMX: STM32 configuration and initialization C code generation*. 2015, DocID025727 Rev 3.
- [5] ST Microelectronics. *UM1718 User manual: STM32CubeMX for STM32 configuration and initialization C code generation*. 2015, DocID025776 Rev 7.
- [6] ST Microelectronics. *UM1690 User manual: Discovery kit for STM32 F0 series with STM32F072RB MCU*. 2014, DocID025474 Rev 2.
- [7] ST Microelectronics. *LFXX: Very low drop voltage regulator with inhibit function*. 2014, DocID025832 Rev 2.
- [8] InvenSense Inc. *MPU-9150: Product Specification Revision 4.3*. 18.9.2013, PS-MPU-9150A-00.
- [9] InvenSense Inc. *MPU-9150: Register Map and Descriptions Revision 4.0*. 12.9.2012, RM-MPU-9150A-00.
- [10] InvenSense Inc. *MPU-9150: Register Map and Descriptions Revision 4.2*. 18.9.2013, RM-MPU-9150A-00.
- [11] Asahi Kasei Corporation. *AK8975/AK8975C: 3-axis Electronic Compass*. 2010, MS1187-E-02.
- [12] Analog Devices Inc. *ADP3301: High Accuracy anyCAP™* 100 mA Low Dropout Linear Regulator*. Rev.A.
- [13] Texas Instruments Inc. *SN65HVD230Q-Q1, SN65HVD231Q-Q1, SN65HVD232Q-Q1: 3.3-V CAN TRANSCEIVERS*. 2002, SGLS398A APRIL 2002 REVISED APRIL 2008.
- [14] Texas Instruments Inc. *Application Report: Controller Area Network Physical Layer Requirements*. 2008, SLLA270.

- [15] Ing. Karel Polák. *Sběrnice CAN*. Elektrovue [online]. 2003, poslední aktualizace 16.6.2003 [cit.16.6.2003]. Dostupné z URL: <<http://www.elektrovue.cz/clanky/03021/index.html>>.
- [16] CiA®org. *CiA*. [online]. Dostupné z URL: <<http://www.can-cia.org/>>.
- [17] Bosch. *The Configuration of the CAN Bit Timing: 6th International CAN Conference*. Turin (Italy), 2.-4.11. 2014, cia99paper.
- [18] Bosch. *CAN Specification*. Stuttgart, 5.4.1991., Version 2.0.
- [19] *I2C.info - Everything About I2C* [online]. Dostupné z URL: <<http://i2c.info/>>.
- [20] Fairchild Semiconductor Corporation. *1N4001-1N4007: General Purpose Rectifiers*. Rev. C1.
- [21] ARM Ltd. *Getting Started: Create Applications with MDK Version 5 for ARM®Cortex®-M Microcontrollers*.
- [22] KING, Brett Allan; PAULSON, Linda Dailey. *Motion Capture Moves into New Realms*. IEEE Xplore, 2007.
- [23] NaturalPoint Inc. *NaturalPoint Tracking Tools Users Manual : Getting Started*. 19.4.2010, Users Manual version 2.0, s. 4-5.
- [24] MENACHE, Alberto. *Understanding Motion Capture for Computer Animation and Video Games*. London:Academic Press, 2000, ISBN: 0-12-490630-3.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

AP	přístupový bod – Access Point
AHB	Advanced High-performance Bus
APB	Advanced Peripheral Bus
CAN	CAN sběrnice – Controller Area Network bus
CPU	centrální procesorová jednotka – Central Processing Unit
CRC	cyklický redundantní součet – Cyclic Redundancy Check
CSV	hodnoty oddělené čárkami - Comma-Separated Values
DLPF	digitální nízkofrekvenční pásmová propust – Digital Low Pass Filter
DMP	Digital Motion Processor
DPS	Deska Plošného Spoje
FLASH	elektricky programovatelná nevolatilní paměť
GPIO	General Purpose Input/Output
I/O	vstupně/výstupní brány – Input/Output
I2C	I2C sběrnice – Inter-Integrated Circuit
IMU	inerciální měřicí jednotka – Inercial Measurement Unit
JTAG	JTAG rozhraní – Joint Test Action Group
MCM	Multi-Chip Module
MCU	mikroprocesor – Microcontroller Unit
MEMS	MEMS senzor – Micro-Electro-Mechanical Systems
SCL	Synchronous Clock
SDA	Synchronous Data
SiP	System in Package
SMD	součástka pro povrchovou montáž plošných spojů – Surface Mount Device

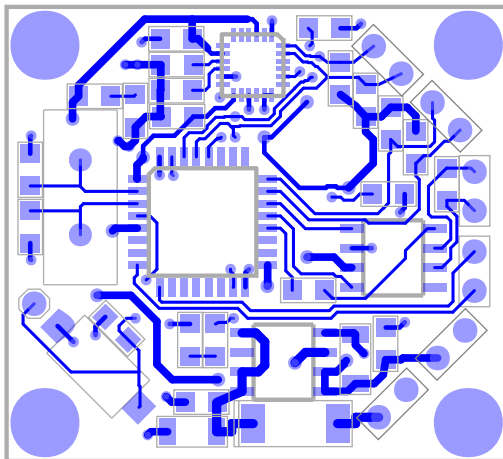
SRAM	statická paměť – Static Random Access Memory
ST	STMicroelectronics
SWD	sériové ladící rozhraní - Serial Wire Debug
TCP	Transmission Control Protocol
UDP	User Datagram Protocol
USART	univerzální synchronní/asynchronní přijímač/vysílač – Universal Synchronous/Asynchronous Receiver/Transmitter
USB	univerzální sériová sběrnice - Universal Serial Bus
VCP	virtuální COM port - Virtual COM Port
Wi-Fi	bezdrátová komunikace v počítačových sítích též jako WLAN - Wireless Local Area Network
WLAN	bezdrátová komunikace v počítačových sítích - Wireless Local Area Network

SEZNAM PŘÍLOH

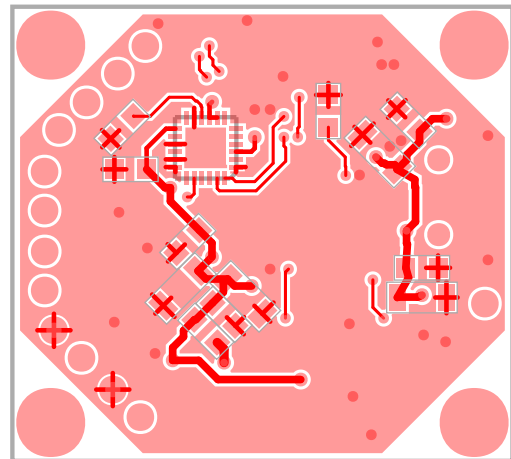
A	Výrobní podklady DPS Final	65
A.1	Návrh DPS Final	65
A.2	Osazovací plán DPS Final	65
A.3	Fotky vyrobené DPS Final	66
A.4	Schéma zapojení DPS Final	66
A.5	Seznam součástek DPS Final	68
B	Výrobní podklady DPS Test1	70
B.1	Návrh DPS Test1	70
B.2	Osazovací plán DPS Test1	70
B.3	Fotky vyrobené DPS Test1	71
B.4	Schéma zapojení DPS Test1	71
B.5	Seznam součástek DPS Test1	73
C	Výrobní podklady DPS Test2	75
C.1	Návrh DPS Test2	75
C.2	Osazovací plán DPS Test2	75
C.3	Fotky vyrobené DPS Test2	76
C.4	Schéma zapojení DPS Test2	76
C.5	Seznam součástek DPS Test2	78
D	Obsah přiloženého CD	79

A VÝROBNÍ PODKLADY DPS FINAL

A.1 Návrh DPS Final

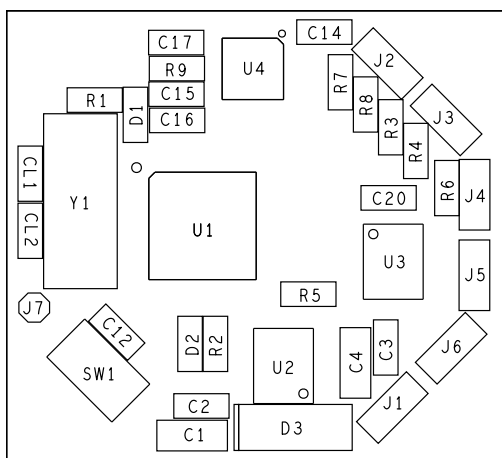


Obr. A.1: Vrstva TOP DPS Final
(2,33:1)

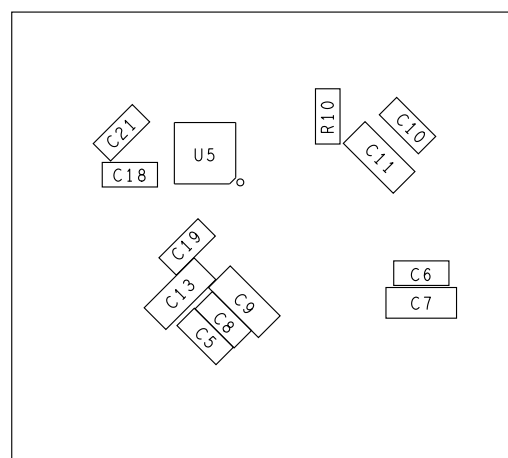


Obr. A.2: Vrstva BOT DPS Final
(2,33:1)

A.2 Osazovací plán DPS Final

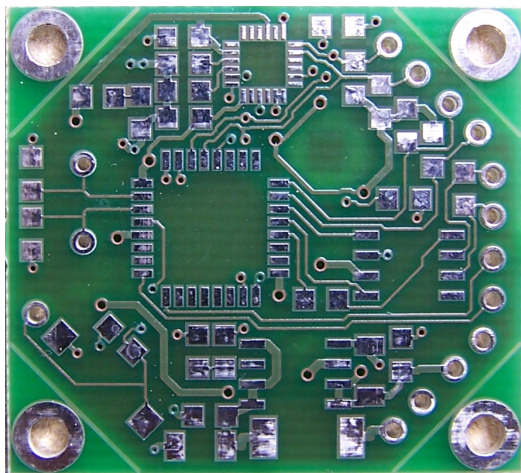


Obr. A.3: Osazovací plán vrstvy TOP
DPS Final

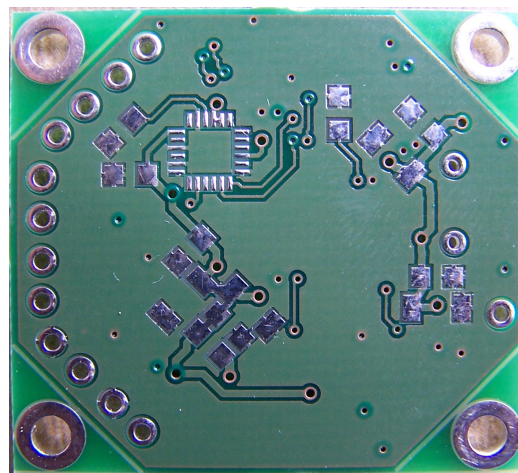


Obr. A.4: Osazovací plán vrstvy BOT
DPS Final

A.3 Fotky vyrobené DPS Final

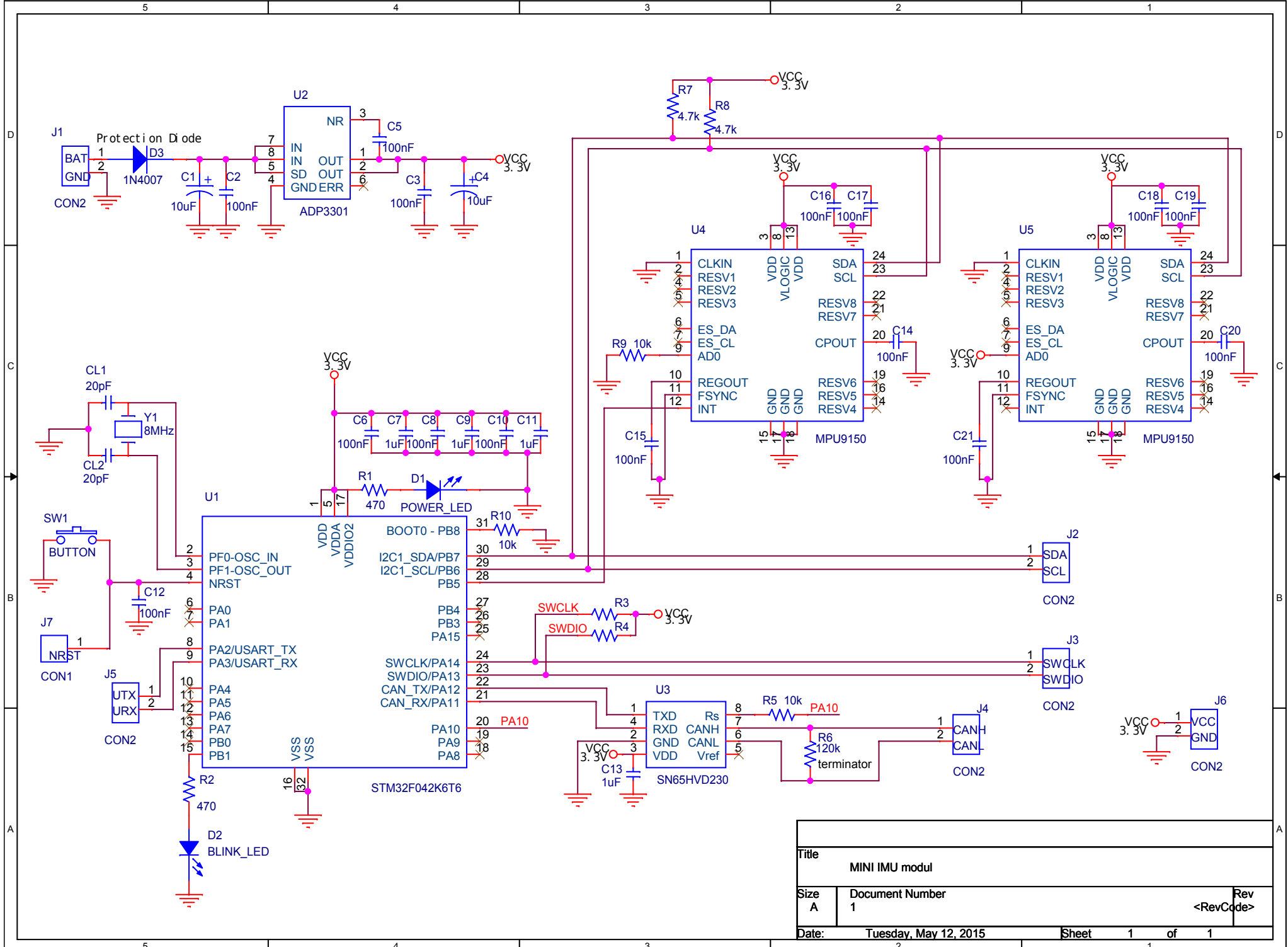


Obr. A.5: Vyrobená DPS Final TOP



Obr. A.6: Vyrobená DPS Final BOT

A.4 Schéma zapojení DPS Final



Title		
MINI IMU modul		
Size	Document Number	Rev
A	1	<RevCode>
Date:	Tuesday, May 12, 2015	Sheet 1 of 1

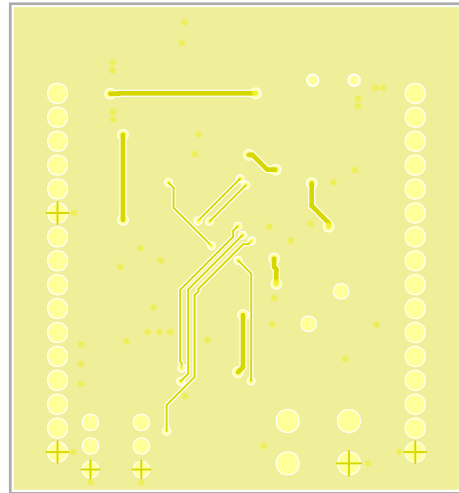
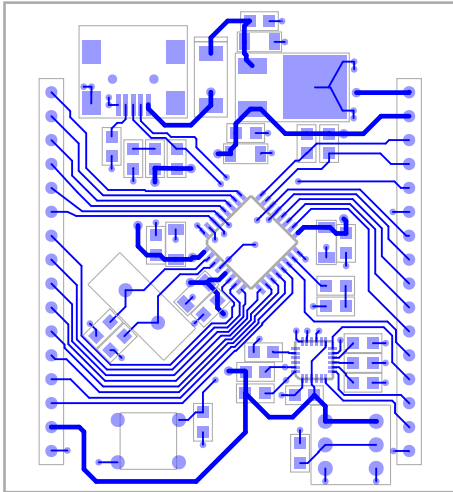
A.5 Seznam součástek DPS Final

Součástka	Hodnota / typ	Pouzdro
C1	10 uF	1206
C2	100 nF	0805
C3	100 nF	0805
C4	10 uF	1206
C5	100 nF	0805
C6	100 nF	0805
C7	1 uF	1206
C8	100 nF	0805
C9	1 uF	1206
C10	100 nF	0805
C11	1 uF	1206
C12	100 nF	0805
C13	1 uF	1206
C14	100 nF	0805
C15	100 nF	0805
C16	100 nF	0805
C17	100 nF	0805
C18	100 nF	0805
C19	100 nF	0805
C20	100 nF	0805
C21	100 nF	0805
CL1	20 pF	0805
CL2	20 pF	0805
D1	červená	0805
D2	červená	0805
D3	1N4007	DO214 SMA
J1	pinová lišta 2 piny	RM 2,54 mm
J2	pinová lišta 2 piny	RM 2,54 mm
J3	pinová lišta 2 piny	RM 2,54 mm
J4	pinová lišta 2 piny	RM 2,54 mm
J5	pinová lišta 2 piny	RM 2,54 mm
J6	pinová lišta 2 piny	RM 2,54 mm
J7	1 pin	RM 2,54 mm

Součástka	Hodnota / typ	Pouzdro
R1	470 Ω	0805
R2	470 Ω	0805
R3	2 k Ω	0805
R4	2 k Ω	0805
R5	10 k Ω	0805
R6	120 k Ω	0805
R7	4,7 k Ω	0805
R8	4,7 k Ω	0805
R9	10 k Ω	0805
R10	10 k Ω	0805
SW1	tlačítko	smd dvoupinové
U1	STM32F042K6T6	LQFP32
U2	ADP3301	SOIC-8
U3	SN65HVD230	SOIC-8
U4	MPU9150	LGA
U5	MPU9150	LGA
Y1	8MHz	HC49/US

B VÝROBNÍ PODKLADY DPS TEST1

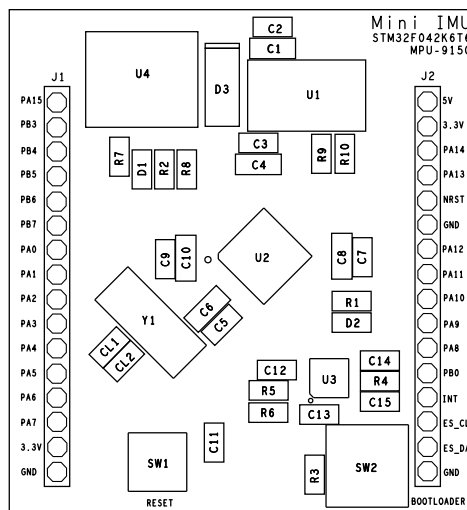
B.1 Návrh DPS Test1



Obr. B.1: Vrstva TOP DPS Test1
(1,35:1)

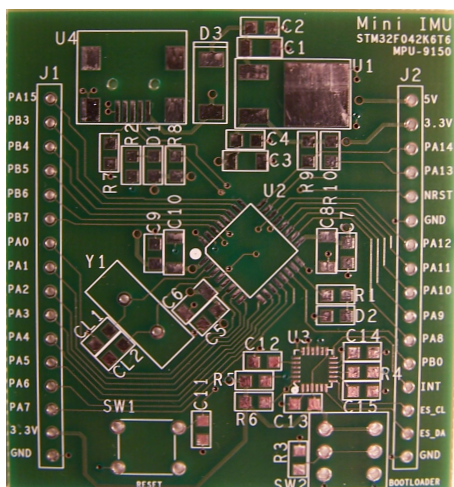
Obr. B.2: Vrstva BOT DPS Test1
(1,35:1)

B.2 Osazovací plán DPS Test1

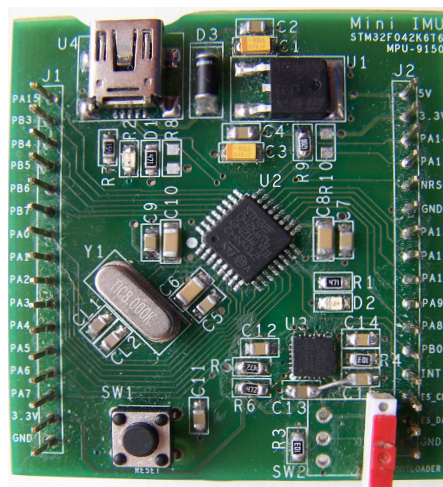


Obr. B.3: Osazovací plán vrstvy TOP DPS Test1

B.3 Fotky vyrobené DPS Test1

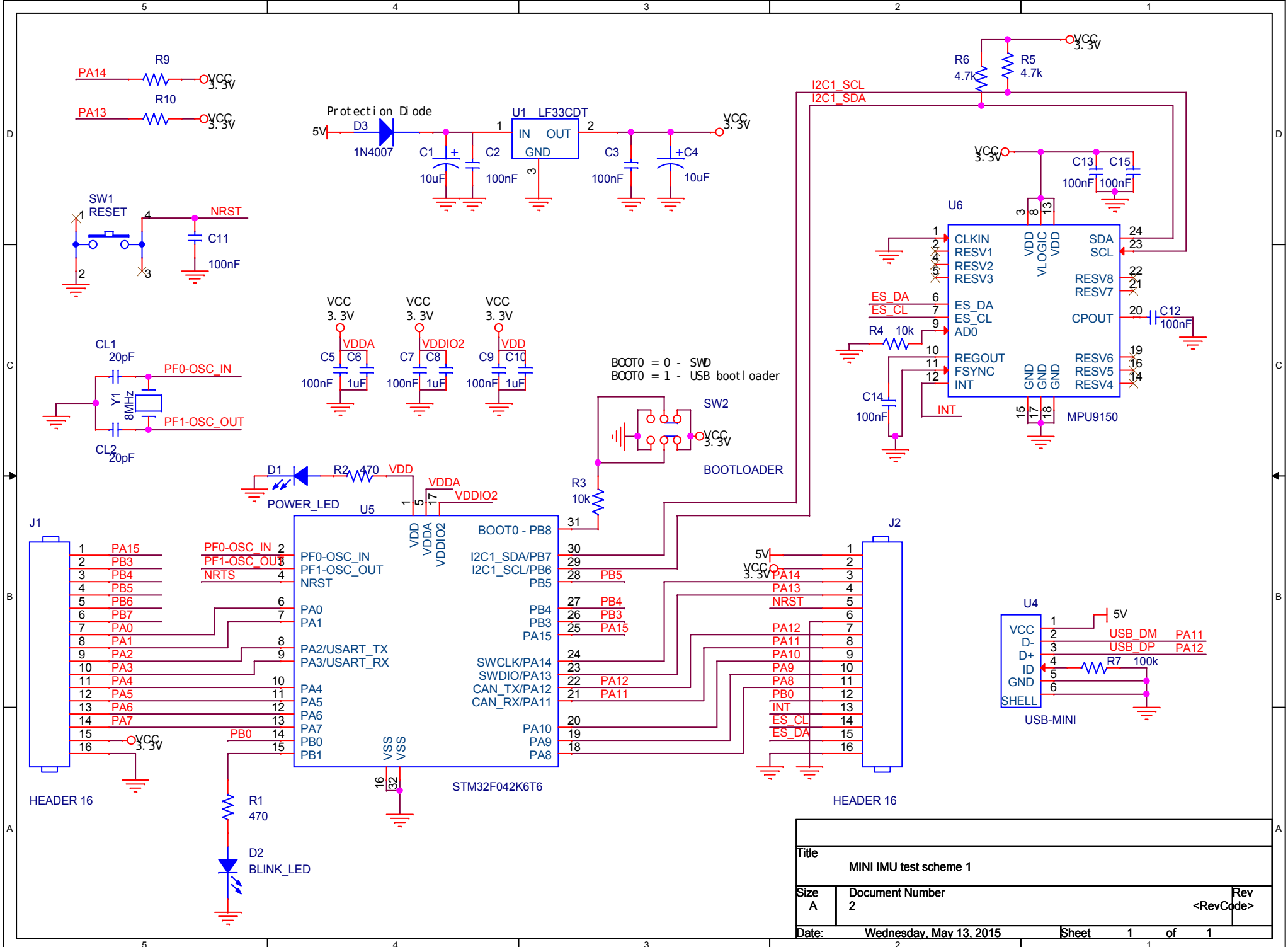


Obr. B.4: Vyrobená DPS Test1



Obr. B.5: Osazená DPS Test1

B.4 Schéma zapojení DPS Test1



Title		
MINI IMU test scheme 1		
Size	Document Number	Rev
A	2	<RevCode>
Date:	Wednesday, May 13, 2015	Sheet 1 of 1

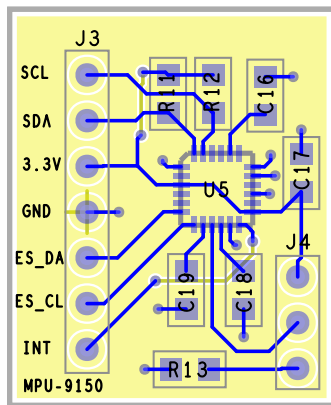
B.5 Seznam součástek DPS Test1

Součástka	Hodnota / typ	Pouzdro
C1	10 uF	1206
C2	100 nF	0805
C3	100 nF	0805
C4	10 uF	1206
C5	100 nF	0805
C6	1 uF	1206
C7	100 nF	0805
C8	1 uF	1206
C9	10 0nF	0805
C10	1 uF	1206
C11	100 nF	0805
C12	100 nF	0805
C13	100 nF	0805
C14	100 nF	0805
C15	100 nF	0805
CL1	20 pF	0805
CL2	20 pF	0805
D1	červená	0805
D2	červená	0805
D3	1N4007	DO214 SMA
J1	pinová lišta 16 pinů	RM 2,54 mm
J2	pinová lišta 16 pinů	RM 2,54 mm
R1	470 Ω	0805
R2	470 Ω	0805
R3	10 k Ω	0805
R4	10 k Ω	0805
R5	4,7 k Ω	0805
R6	4,7 k Ω	0805
R7	100 k Ω	0805
R9	2 k Ω	0805
R10	2 k Ω	0805
SW1	tlačítko	B3F
SW2	tlačítkový spínač	B1702A

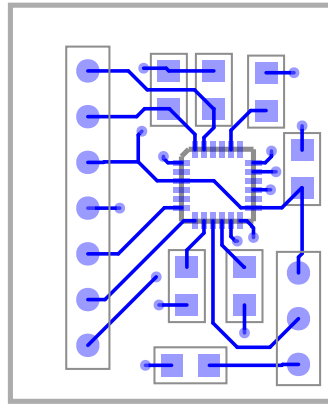
Součástka	Hodnota / typ	Pouzdro
U1	LF33CDT	DPAK
U4	USB-Mini konektor	USB-Mini smd
U5	STM32F042K6T6	LQFP32
U6	MPU9150	LGA
Y1	8MHz	HC49/US

C VÝROBNÍ PODKLADY DPS TEST2

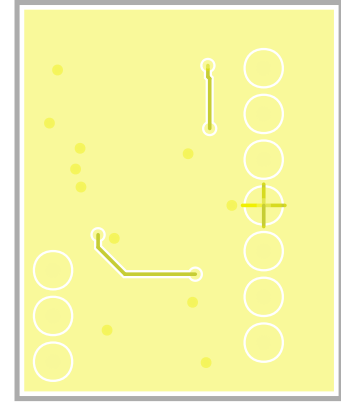
C.1 Návrh DPS Test2



Obr. C.1: Návrh DPS Test2

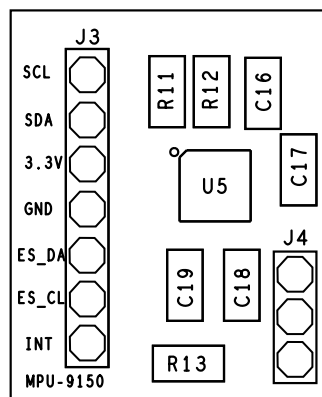


Obr. C.2: Horní vrstva DPS Test2 (2,77:1)



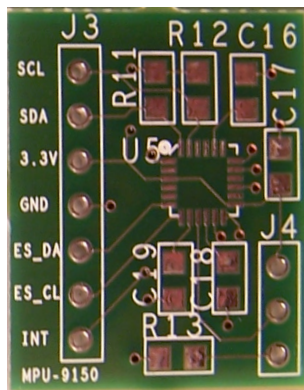
Obr. C.3: Spodní vrstva DPS Test2 (2,77:1)

C.2 Osazovací plán DPS Test2

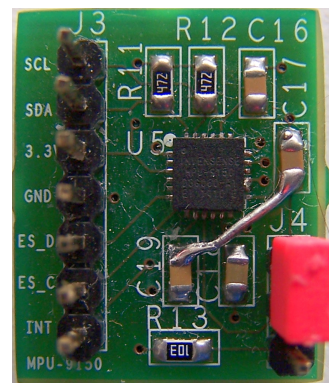


Obr. C.4: Osazovací plán vrstvy TOP DPS Test2

C.3 Fotky vyrobené DPS Test2

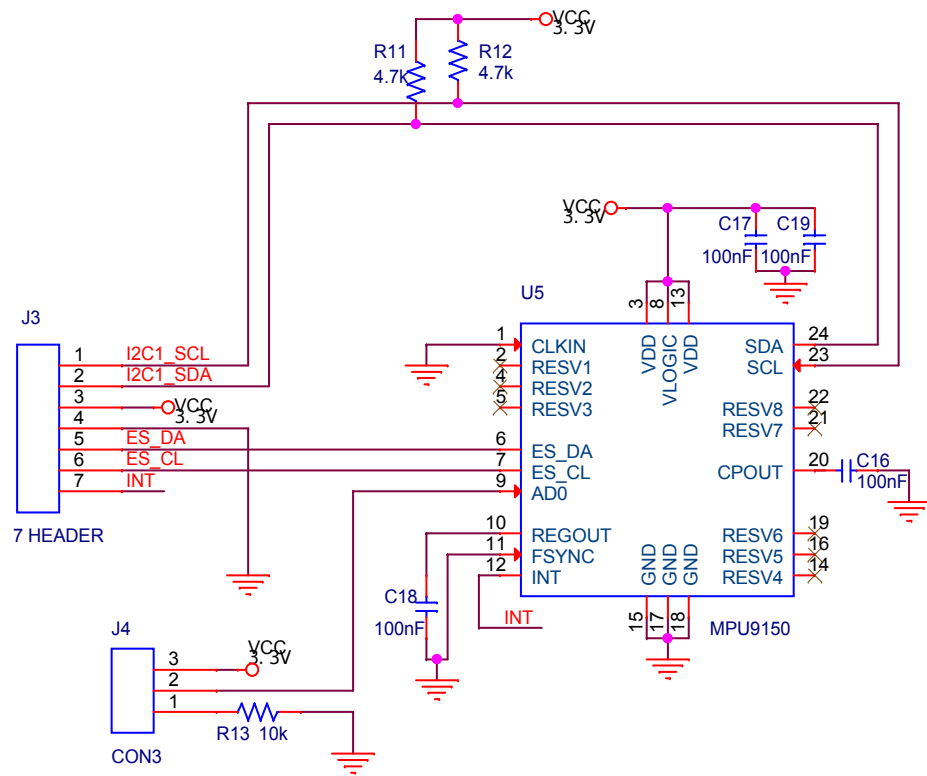


Obr. C.5: Vyrobena DPS Test2



Obr. C.6: Osazena DPS Test2

C.4 Schéma zapojení DPS Test2



Title		
MINI IMU test scheme 2		
Size	Document Number	Rev
A	3	<RevCode>
Date:	Wednesday, May 13, 2015	Sheet 1 of 1

C.5 Seznam součástek DPS Test2

Součástka	Hodnota / typ	Pouzdro
C16	100 nF	0805
C17	100 nF	0805
C18	100 nF	0805
C19	100 nF	0805
J3	pinová lišta 7 pinů	RM 2,54 mm
J4	pinová lišta 3 piny	RM 2,54 mm
R11	4,7 k Ω	0805
R12	4,7 k Ω	0805
R13	10 k Ω	0805
U5	MPU9150	LGA

D OBSAH PŘILOŽENÉHO CD

Přiložené CD obsahuje následující soubory:

BP_MucalaJan_2015.pdf:	Elektronická verze BP.
MotionCaptureApp.zip:	PC aplikace pro obsluhu systému.
STM32_Firmware.zip:	FW vyvinutých modulů a použitého Discovery kitu.
PCB_Design.zip:	Navržené DPS všech tří modulů.