

Bakalářská práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra Mikroelektroniky

Navigační jednotka využívající senzory s vysokým rozlišením

Patrik Bachan

Komunikace, multimédia a elektronika: Aplikovaná elektronika

Květen 2017

Vedoucí práce: Ing. Martin Šipoš, Ph.D.

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Bachan** Jméno: **Patrik** Osobní číslo: **420181**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra mikroelektroniky**
Studijní program: **Komunikace, multimédia a elektronika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektronika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Navigační jednotka využívající senzory s vysokým rozlišením

Název bakalářské práce anglicky:

Navigation Unit Using High Resolution Sensors

Pokyny pro vypracování:

Seznamte se se současnou verzí hardwaru inerciální měřicí jednotky (IMU) skládající se z trojice gyroskopů s optickým vláknem (FOG) s digitálním výstupem DSP3100 a trojice akcelerometrů s analogovým výstupem INN-204. Výstupy akcelerometrů jsou digitalizovány pomocí 31 bitových AD převodníků ADS1282, jehož výstupy jsou společně s výstupy z gyroskopů v současné verzi vedeny do mikrokontroléru STM32F405, který kromě vyčítání a předzpracování dat z inerciálních senzorů rovněž vyčítá a předzpracovává data z externího magnetometru HMR2300 a GNSS modulu uBlox NEO-6P. V rámci BP zrevidujte, upravte a realizujte desky plošných spojů, které budou realizovat napájecí blok celé IMU jednotky, blok digitalizace akcelerometrů s vhodným anti-aliasingovým filtrem a blok s řídicí výpočetní jednotkou, kdy proti původní verzi bude využit mikrokontroler STM32F7xx. Vyrobené DPS osadte a jednotlivé bloky oživte a mikrokontroler naprogramujte tak, aby byl schopen vyčítat data ze všech senzorů a systémů a tato data ověřte z pohledu jejich správnosti.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Mark I. Montrose: EMC and the Printed Circuit Board. Design, Theory, and Layout Made Simple, IEEE 1999
- [2] Záhlava V.: Návrh a konstrukce desek plošných spojů, Principy a pravidla praktického návrhu. BEN - technická literatura, Praha 2011
- [3] EMC design guide for ST microcontrollers [online], <http://www.st.com/>

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Martin Šipoš Ph.D., doktorand K13138

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

Datum zadání bakalářské práce: **09.02.2017** Termín odevzdání bakalářské práce: _____

Platnost zadání bakalářské práce: **10.09.2018**

Podpis vedoucí(ho) práce

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování / Prohlášení

Rád bych zde poděkoval Ing. Martinu Šipošovi, Ph.D. za pomoc při psaní této bakalářské práce. Také bych chtěl poděkovat mojí matce za vytrvalou podporu při studiu. Velký dík patří i mým kamarádům a kolegům, kteří měli nápady na řešení různých problémů, se kterými jsem se setkal při řešení této práce.

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

Abstrakt / Abstract

Bakalářská práce se zabývá návrhem a realizací elektroniky pro inerciální navigační jednotku se senzory s vysokým rozlišením. Cílem práce je nahrazení předchozí elektroniky pro dosažení vyšší přesnosti a vyššího výpočetního výkonu. Pozornost je věnována digitalizační části elektroniky pro zpracování signálu z analogových senzorů.

Bachelor thesis deals with design and implementation of electronics for inertial navigation unit with high resolution sensors. The aim of the thesis is to replace the previous electronics in order to achieve higher accuracy and higher computing power. Attention is paid to the digitizing part of the electronics for signal processing from analog sensors.

Obsah /

1 Úvod	2
2 Inerciální měřicí jednotka	3
3 Senzory	4
3.1 Gyroskopy	4
3.1.1 Sagnacův jev	4
3.1.2 Gyroskop s optickým vláknem DSP-3100	5
3.2 Akcelerometry	6
3.2.1 Piezoelektrický jev	6
3.2.2 Akcelerometr INN-204	7
4 Motivace k návrhu nové elektroniky	8
5 Digitalizace signálu analogových akcelerometrů	9
5.1 Výstupní signál z akcelerometru INN-204	9
5.2 Převod na měřenou veličinu	9
5.2.1 Transimpedanční zesilovač	9
5.2.2 Rezistor	10
5.2.3 Integrátor	10
5.3 Analogový filtr	11
5.3.1 Spínané filtry	11
5.3.2 Spojité filtry	11
5.3.3 Typ filtru	12
5.4 Digitalizace výstupního signálu převodníku	12
5.4.1 $\Sigma - \Delta$ AD Převodník	12
5.5 Návrh modulu pro předzpracování a digitalizaci signálu	13
5.6 Realizace	14
5.6.1 DPS akcelerometru	14
5.6.2 DPS s převodníkem	15
5.7 Oživení	16
5.8 Testování	17
6 Mikroprocesorová deska	19
6.1 Mikrokontrolér STM32F765	19
6.2 GNSS Přijímač u-blox NEO-M8P	19
6.3 Návrh	19
7 Napájení jednotky	21
8 Závěr a budoucí vývoj	22
Literatura	23
A Katalogový list gyroskopu	25
B Katalogový list akcelerometru ..	27
C Schéma desek digitalizace akcelerometru	28
D Schéma mikroprocesorové desky	32

Tabulky / Obrázky

3.1. Základní parametry gyroskopu DSP-3100	5
3.2. Základní parametry akcelerometru INN-204	7
2.1. Diagram IMU, AHRS, INS	3
3.1. Sagnacův jev	5
3.2. Sestava gyroskopů DSP-3100	6
3.3. Diagram piezoelektrického akcelerometru	6
3.4. Akcelerometr INN-204	7
4.1. Původní mikroprocesorová deska	8
4.2. Původní deska pro digitalizaci signálu akcelerometru	8
5.1. Transimpedanční zesilovač	9
5.2. Převodní rezistor	10
5.3. Integrátor	10
5.4. Princip spínaného filtru	11
5.5. Topologie Sallen-Key	12
5.6. Charakteristiky filtrů	12
5.7. Blokové schéma digitalizační desky	13
5.8. Zapojení LTC6362	13
5.9. Deska akcelerometru	14
5.10. Deska zpracování signálu	15
5.11. Osazené desky akcelerometru ..	16
5.12. Testování digitalizační desky ..	17
5.13. Šum elektroniky	17
5.14. Měřený výstup z akcelerometru v klidu	18
5.15. Měřený výstup z akcelerometru v pohybu	18
6.1. Blokové schéma řídicí desky ...	20
6.2. Mikroprocesorová deska	20
7.1. Blokové schéma napájecí desky	21

Seznam použitých zkratek

AD	■ Analogově Digitální
AHRS	■ Attitude and heading reference system
ARM	■ Advanced RISC Machines
BeiDou	■ Autonomní družicový polohový systém Čínské lidové republiky
CAN	■ Controller Area Network
DMIPS	■ Dhrystone Millions of Instructions Per Second
DSP	■ Digital Signal Procesor
ESD	■ Electrostatic Discharge
FOG	■ Fiber Optic Gyroscope
FPU	■ Floating Point Unit
GALILEO	■ Evropský autonomní globální družicový polohový systém
GLONASS	■ Ruský globální družicový polohový systém
GNSS	■ Global Navigation Satellite System
GPS	■ Global Positioning System
IMU	■ Inertial Measurement Unit
INS	■ Inertial Navigation System
MEMS	■ MicroElectroMechanical Systems
MFB	■ Multiple FeedBack
RTK	■ Real Time Kinematics
SPI	■ Serial Peripheral Interface
UART	■ Universal Asynchronous Receiver and Transmitter
USB	■ Universal Serial Bus

Kapitola 1

Úvod

Znalost police v prostoru ať už dopravních prostředků, autonomních systémů nebo jiných aplikací je dnes již nezbytná. V současné době jsou dostupná řešení navigace s využitím GNSS jako jsou například GPS, GLONASS, GALILEO, BeiDou, atd. Tyto systémy pracují na principu známé polohy satelitů umístěných na oběžné dráze, které vysílají definovanou a synchronizovanou sekvenci. Protějškem těchto satelitů je pasivní zařízení, které je z doby letu signálu od jednotlivých satelitů schopné dopočítat vlastní polohu. Údržba a modernizace takových technologií je nákladná. V případě výpadku nebo ztráty signálu ze satelitů je informace o poloze ztracena. Na přesnost měřené polohy mají vliv faktory jako jsou atmosférické podmínky, rušení v pracovním pásmu a další.

Některé nedostatky řeší inerciální navigační systémy. Ze sil působících na systém jsou schopny spočítat polohu od známé výchozí polohy a také polohové úhly, což je s GNSS možné, ale jedná se o nákladné a složité řešení bez schopnosti zachytit dynamiku systému. Jejich velkou výhodou je nezávislost na jakémkoliv vnějším zařízení, jako jsou satelity na oběžné dráze u GNSS. Vše potřebné si takové zařízení nese s sebou. Takový inerciální systém pak ze změřeného translačního zrychlení, úhlových rychlostí a znalosti počáteční polohy dokáže vypočítat aktuální pozici.

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem a realizací elektroniky pro sběr, zpracování a vyhodnocení signálů z analogových akcelerometrů, sběrem dat z digitálních gyroskopů s optickým vláknem a následně návrhem a realizací hardwaru pro zpracování dat a implementaci pokročilých navigačních algoritmů.

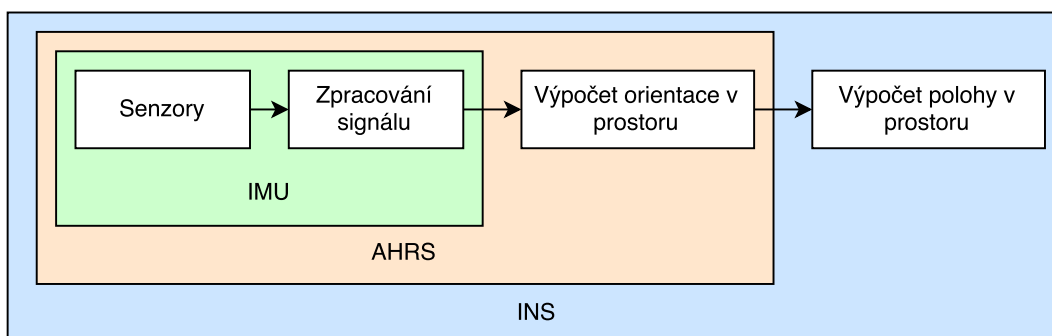
Kapitola 2

Inerciální měřicí jednotka

Inerciální měřicí jednotka (Inertial Measurement Unit - IMU), je zařízení schopné měřit lineární zrychlení a úhlovou rychlost ve třech osách. K tomu využívá soustavu akcelerometrů a gyroskopů. Jednotka se stará o zpracování signálů z jednotlivých senzorů pro další zpracování.

Přidáním magnetometru schopného měřit magnetické pole Země ve třech osách a potřebného matematického aparátu lze vytvořit jednotku schopnou určit polohové úhly (příčný náklon, podélný sklon, kurz), neboli orientaci daného prostředku. Taková jednotka se zkráceně nazývá AHRS.

Rozšířením AHRS lze získat inerciální navigační systém nebo-li INS. Takový systém je schopný z dat inerciálních senzorů vypočítat polohu. Pro výpočet aktuální polohy je nutné znát výchozí polohu. Tu lze získat třeba z některého z GNSS systémů jako jsou například GALILEO, GPS, GLONASS, atd. Přijímač GNSS často bývá součástí INS a jako celek dokáže takový systém určit polohu s velmi vysokou přesností.



Obrázek 2.1. Srovnání IMU, AHRS, INS.

Kapitola 3

Senzory

Základem inerciální navigační jednotky s vysokým rozlišením jsou senzory s vysokou citlivostí. Zdaleka ne všechny typy senzorů dosahují takových parametrů, aby byly použitelné v inerciální navigační jednotce.

V dnešní době se lze setkat s integrovanými senzory typu MEMS, které jsou schopné měřit zrychlení i úhlovou rychlost ve všech třech osách, digitalizovat měření a aplikovat na ně digitální filtry či další algoritmy předzpracování signálu. Takové senzory se vejdou i do jediného pouzdra. Nevýhodou těchto senzorů je nízká citlivost, drift, teplotní závislost a velký šum. Jejich nasazení je vhodné spíše do spotřební elektroniky, kde je kladen důraz na rychlost, malé rozměry, nízkou spotřebu a cenu a není vyžadována vysoká přesnost ¹.

Pro jednotku, která vyžaduje vysokou přesnost, jsou vhodné senzory pracující na jiných principech.

3.1 Gyroskopy

Gyroskopy jsou senzory schopné měřit úhlovou rychlost. V této měřicí jednotce jsou využity gyroskopy s optickým vláknem (FOG), které pracují díky Sagnacově jevu. S využitím tohoto principu lze dosáhnout vysokých rozlišení.

3.1.1 Sagnacův jev

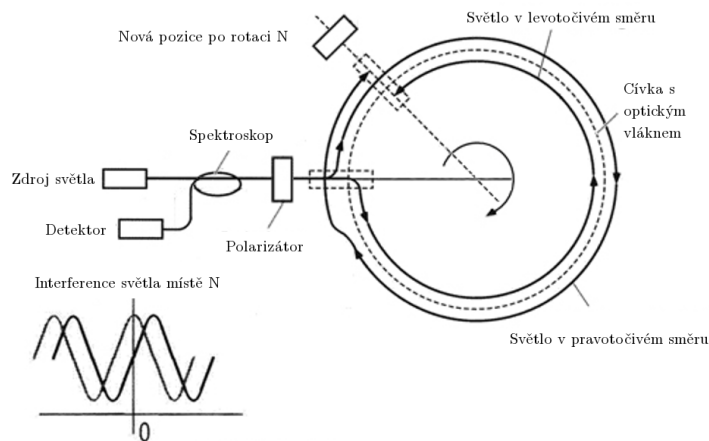
Jev lze pozorovat při vyslání monochromatického paprsku do obou konců smyčky z optického vlákna. Za předpokladu, že je smyčka v klidu, světlo opustí smyčku z obou konců v ten samý okamžik.

Pokud je ale se smyčkou otáčeno okolo její osy rotace, světlo z jednoho konce optického vlákna urazí delší dráhu než světlo vyslané z druhého konce, což se projeví jako rozdílný čas, kdy světlo opustí optické vlákno na každém konci. Z vyhodnocení časového rozdílu lze stanovit, jak rychle bylo smyčkou otáčeno.

Časový rozdíl, kdy světlo opustí optické vlákno je tak malý, že je vhodné jej měřit interferometrem.

Nákres gyroskopu pracujícího na Sagnacově jevu je uveden na obrázku 3.1.

¹ <https://www.invensense.com/products/motion-tracking/6-axis/>



Obrázek 3.1. Princip gyroskopu založeného na Sagnacově jevu[1].

■ 3.1.2 Gyroskop s optickým vláknem DSP-3100

Pro měření úhlové rychlosti jsou v inerciální jednotce využity optické vláknové gyroskopy DSP-3100 od firmy KVH¹. Sensor pracuje na jevu uvedeném v kapitole 3.1.1, kdy je uvnitř senzoru navinuto optické vlákno. Sensor poskytuje digitální data, která jsou odesílá po asynchronní sběrnici RS-422. Každý vzorek udává úhel natočení od předchozího vzorku. Výstupem tedy není přímo úhlová rychlost, ale pouze relativní úhel. Úhlovou rychlost je nutné dopočítat ze změřeného úhlu a času mezi vzorky.

Měření těchto senzorů není možné synchronizovat externí událostí. V důsledku pak není možné synchronizovat data ze všech senzorů a mít kompletní sadu měření pro všechny osy v pravidelném intervalu.

Nejvýznamnější parametry gyroskopů s optickým vláknem DSP-3100 použitých v inerciální navigační jednotce jsou uvedeny v tabulce 3.1, kompletní specifikace je uvedena v příloze A. Na obrázku 3.2 je vidět konstrukce pro uchycení gyroskopů ve 3 osách.

Parametr	Jednotka	Hodnota
Rozsah	°/s	±375
Nestabilita (25°C)	°/h	≤1
Nestabilita vs. teplota (≤ 1°C/min)	°/h	≤6
Offset (25°C)	°/h	±20
Nelinearita scale-faktoru	ppm	≤ 500
Scale-faktor vs. teplota (≤ 1°/min)	ppm	≤500
Náhodná odchylka úhlu (25°C)	°√hr	≤0.067
Napájecí napětí	V	5
Spotřeba	W	3
Baud rate	kbaud	375
Frekvence vzorkování	Hz	1000

Tabulka 3.1. Základní parametry gyroskopu DSP-3100. Více v příloze A.

¹ <http://www.kvh.com/>



Obrázek 3.2. Sestava gyroskopů DSP-3100[2].

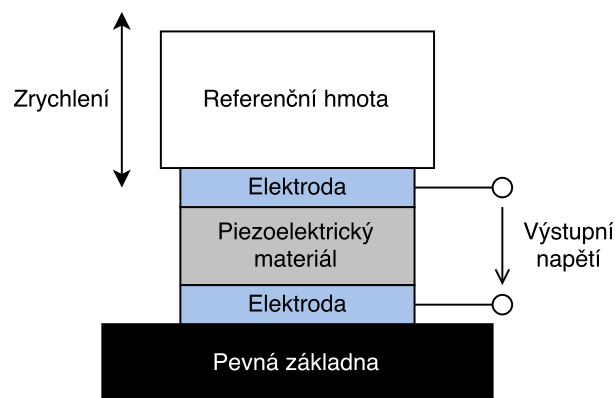
3.2 Akcelerometry

Akcelerometry jsou senzory schopné měřit lineární zrychlení. V dané jednotce jsou osazeny akcelerometry fungující na principu piezoelektrického jevu.

3.2.1 Piezoelektrický jev

Tento jev lze pozorovat na některých materiálech, které jsou pro tuto vlastnost nazývaných piezoelektrické. Nejčastěji se jedná o krystaly nebo speciální keramické směsi. Pokud jsou tyto materiály deformovány, například stlačovány, dochází na nich ke vzniku elektrického napětí, které je úměrné síle působící na krystal. Pro měření zrychlení stačí takový materiál umístit mezi objekt, jehož zrychlení je měřeno, a referenční hmotu, která je pevně spojena s krystalem. Výsledná síla působící na krystal je pak úměrná této hmotě a působícího zrychlení $F = m \cdot a$.

Zjednodušená konstrukce takového akcelerometru je vidět na obrázku 3.3.



Obrázek 3.3. Diagram piezoelektrického akcelerometru

3.2.2 Akcelerometr INN-204

Měření zrychlení ve 3 osách zajišťují akcelerometry INN-204 od firmy Innalabs¹. Senzor měří zrychlení pomocí piezoelektrického principu popsaného v kapitole 3.2.1. Výstupem senzoru je analogový signál, kdy měřené zrychlení je úměrné výstupnímu proudu, jehož výhodou je vysoká odolnost vůči rušení. I když je senzor schopen měřit zrychlení až do $\pm 30g$, v této jednotce je využitý rozsah pouze $\pm 5g$, což je plně dostačující pro výsledné aplikace. Rozsah AD převodníku je pak využit pro převod pouze v tomto rozmezí čímž je dosaženo vyššího rozlišení. Akcelerometr disponuje druhým proudovým výstupem jehož proud je úměrný vnitřní teplotě akcelerometru. Pomocí měřené teploty lze provádět korekci dat akcelerometru, která je při vysoké citlivosti senzoru nezbytná.

Nejvýznamnější parametry Quartz akcelerometrů INN-204 použitých v inerciální navigační jednotce jsou uvedeny v tabulce 3.2, kompletní specifikace je uvedena v příloze B. Na obrázku 3.4 je vidět jeden se tří senzorů.

Parametr	Jednotka	Hodnota
Rozsah	g	± 30
Offset	mg	< 10
Roční drift offsetu	μ	< 200
Offset vs. teplota	$\mu g/^{\circ}C$	< 100
Scale-Faktor	mA/g	1,23 – 1,43
Roční drift scale-faktoru	ppm	< 200
Scale-Faktor vs. teplota	ppm/ $^{\circ}C$	< 200
Nesouosost	μrad	< 2000
Roční drift nesouososti	μrad	< 100
Nelinearita	$\mu g/g^2$	< 100
Pracovní teplota	$^{\circ}C$	$-55 - +85$
Rozlišení	μg	< 5
Proudový odběr	mA	16
Napájecí napětí	V	$\pm 12 - \pm 18$

Tabulka 3.2. Základní parametry akcelerometru INN-204.



Obrázek 3.4. Akcelerometr INN-204[2].

¹ <http://www.innalabs.com/>

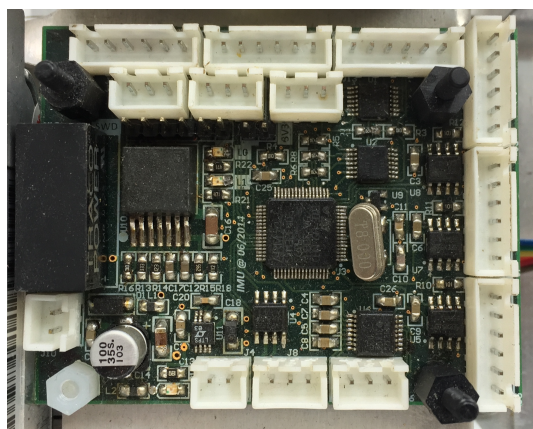
Kapitola 4

Motivace k návrhu nové elektroniky

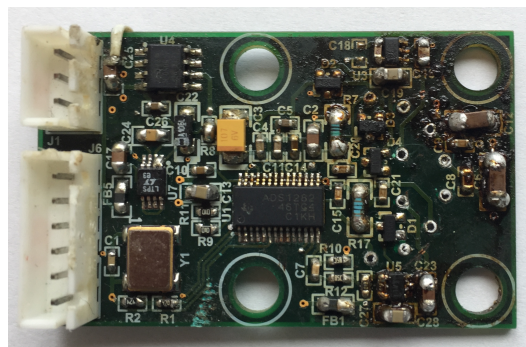
Tato bakalářská práce se zabývá návrhem a realizací elektroniky pro digitalizaci, sběr a vyhodnocení dat z trojice Quartz akcelerometrů a gyroskopů s optickým vláknem. Původně již byla jednotka zrealizována, ale její testy a experimenty ukázaly na nedostatky v předchozím návrhu. V rámci předchozích analýz byly zjištěny problémy v digitalizační části. Digitalizaci analogového signálu prováděl $\Sigma - \Delta$ AD převodník ADS1282 [3], který střídavě převáděl signál z akcelerometru a z jeho vnitřního snímače teploty. Střídání mezi výstupem akcelerometru a vnitřním senzorem teploty si vyžádalo zvýšení vzorkovací frekvence převodníku a tím i zvýšení šumu. Jako antialiasingový filtr sloužil pasivní filtr prvního řádu realizovaný z RC článku. Symetrické napájení pro akcelerometry bylo stabilizováno na vzdálené napájecí desce a celá digitalizační část byla napájena z $\pm 9V$ výstupu ze senzoru. V důsledku se pak do senzoru dostávalo rušení ze zbytku elektroniky. Akcelerometry byly výkonově zatíženy, když z výstupu, u kterých výrobce neudává jiné parametry než výstupní napětí, byla napájena další elektronika. Výkonová ztráta v senzorech způsobovala jejich zahřívání, což mělo za následek prodloužení doby ustálení teploty na její pracovní hodnotu. Omezení napětí signálu kvůli ochraně převodníku bylo řešeno Schottkyho diodami. Pokud byl pak senzor vystaven přetížení přes rozsah, nadproud byl zachycen diodami. Problém tohoto řešení je, že Schottkyho diody mají vysoký zpětný proud, který u použitých diod může dosahovat až $2\mu A$. Diody byly zapojeny mezi signál a napájení analogové části což byla další možná cesta průniku rušení do užitečného signálu poskytující údaj o měřeném zrychlení.

Původní řídicí deska obsahovala mikrokontrolér STM32F405, měniče a regulátory zajišťující napájení celé jednotky. Neobsahovala GNSS modul, který se připojoval externě.

Na obrázcích 4.1 a 4.2 je vidět původní návrh řídicí elektroniky a elektroniky pro digitalizaci a sběr dat z akcelerometru INN-204. Nečistoty na původní desce akcelerometru jsou zbytky tavidla odpařeného při odpajování samotných akcelerometrů



Obrázek 4.1. Původní mikroprocesorová deska.



Obrázek 4.2. Původní deska pro digitalizaci signálu akcelerometru.

Kapitola 5

Digitalizace signálu analogových akcelerometrů

5.1 Výstupní signál z akcelerometru INN-204

Výstup z akcelerometru je analogový proudový signál v řádu až desítek mA. Pro tuto aplikaci je požadován rozsah $\pm 5g$ což při převodním poměru $1,5mA/g$ znamená výstupní proudový rozsah $\pm 7,5mA$.

V katalogovém listu je uvedeno, že napětí mezi proudovým výstupem a zemí je omezeno na $2,5V$ od napájecích napětí. Při předpokládaném napájení $\pm 15V$ je napětí na proudovém výstupu omezeno v rozsahu $\pm 12,5V$.

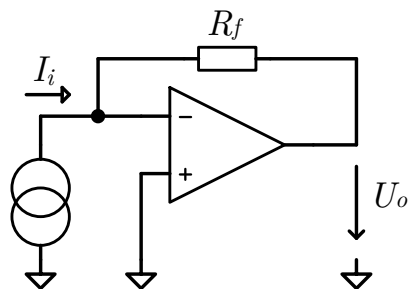
Pro využití maximální citlivosti, kterou akcelerometr disponuje, tj. $5\mu g$, čemuž odpovídá přibližně $7,5nA$, je zapotřebí měřit výstupní proud akcelerometru v rozsahu $\pm 7,5mA$ s rozlišením na $7,5nA$. Dynamický rozsah takového převodu je $123dB$. Měřicí přístroje jsou v dnešní době schopné měřit v ještě větším dynamickém rozsahu, avšak vzorkovací frekvence pak bývá v jednotkách Hz. Zpracování signálu s takto vysokým rozlišením a vzorkovací frekvencí $1kHz$ je náročný úkol. Omezený prostor v měřicí jednotce také ztěžuje realizaci elektroniky schopné převodu s takovými parametry.

5.2 Převod na měřenou veličinu

Výstupem použitého analogového senzoru je elektrický proud úměrný působícímu zrychlení. Tento proud je pro digitální zpracování potřeba převést na číslo. Existuje několik možností jak toho docílit. Nejjednodušším způsobem se jeví použití již hotového AD převodníku. Avšak většina AD převodníků používá jako vstupní veličinu napětí. Proto je potřeba proud ze senzoru převést na napětí.

5.2.1 Transimpedanční zesilovač

Jedním z možných zapojení je transimpedanční zesilovač, kdy se jedná o zapojení s operačním zesilovačem, kde je vstupem proud a výstupem napětí. Základní zapojení takového zesilovače je uvedeno na obrázku 5.1.



Obrázek 5.1. Transimpedanční zesilovač.

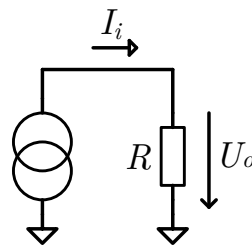
Převodní poměr je určen zpětnovazebním odporem R_f . Platí zde vztah:

$$U_o = -R_f I_i$$

Výhodou takového převodního členu je vysoké zesílení, které umožňuje pracovat se vstupními proudy v řádech pA. Další důležitou vlastností je pevný potenciál proudového vstupu. Pro tuto aplikaci však není daný obvod vhodný, protože přidává do signálové cesty aktivní prvek a tím zvyšuje šum výstupního signálu. Pevný vstupní potenciál znemožňuje omezení výstupního rozsahu senzoru, kterého lze dosáhnout díky limitovanému výstupnímu napětí proudového vstupu akcelerometru.

■ 5.2.2 Rezistor

Nejjednodušším způsobem převodu proudu na napětí je pomocí rezistoru. Takto realizovaný převodník je uveden v obrázku 5.2.

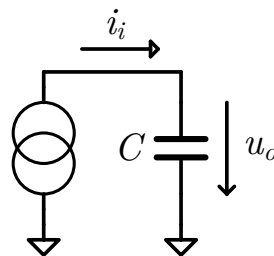


Obrázek 5.2. Převod $I \rightarrow U$ pomocí rezistoru.

Jedná se o základní aplikaci Ohmova zákona, kde platí $U = R \cdot I$. Jediné místo vzniku šumu je na rezistoru. Při znalosti krajních napětí výstupu senzoru lze vypočítat snímací odpor tak, aby při $\pm 5g$ dosáhl právě těchto napětí. Tak dosáhneme maximálního rozsahu výstupu, který se pak dále zpracovává a znemožníme akcelerometru pustit z výstupu větší proud.

■ 5.2.3 Integrátor

Další možností převodu proudu na číslo je jeho integrace v kondenzátoru a měření doby nabíjení na stanovenou úroveň. Případně nabíjení s konstantním časem a následné vybíjení definovaným proudovým zdrojem a měření doby, než kondenzátor dosáhne definovaného napětí. Základní schéma s kondenzátorem pro akumulaci náboje je na obrázku 5.3. Vztah (1) pak popisuje průběh napětí na kondenzátoru v čase.



Obrázek 5.3. Integrace v kondenzátoru.

$$u_o(t) = u_o(0) + \frac{1}{C} \int_0^t i_i(t) dt \quad (1)$$

Na takovém principu pracují integrační AD převodníky, které mají navíc na vstupu sériový rezistor, aby vstupní napětí převedly na proud. Pro opakovatelné měření je důležité uvést před každým měřením tento kondenzátor do výchozího stavu. Nejčastěji se vybíjí zkratováním. Z tohoto důvodu musí být kondenzátor malé kapacity, aby nevznikaly velké proudové pulzy a vybití proběhlo řádově rychleji než nabíjení při měření. Převodníky takové konstrukce jsou vhodné pro malé proudy, kdy jsou převodní časy ještě měřitelné v řádech ms. Dalším problémem by v případě tohoto převodníku byla implementace bipolárního převodu. Proto tento způsob převodu pro nás není vhodný.

5.3 Analogový filtr

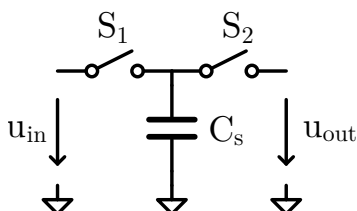
Při převodu spojitého signálu na diskrétní dochází ke ztrátě informace mezi vzorky. Dojde-li k porušení vzorkovacího teorému, tj. $f_{in} \leq \frac{f_s}{2}$, začne docházet k aliasingu.

Aliasing můžeme pozorovat, když například vyfotíme nástěnné hodiny každých 12 hodin. Přehrajeme-li zaznamenanou sekvenci, hodiny se budou jevit jako zastavené.

Pokud dojde k aliasingu, není již možné ze vzorků zrekonstruovat vstupní signál. Aby se tomuto jevu zabránilo, přidává se před AD převodník filtr typu dolní propust [4–5].

5.3.1 Spínané filtry

Rozšířeným typem filtrů jsou v současné době často využívané filtry spínané (zjednodušené schéma na obrázku 5.4), které pracují na principu spínaných kondenzátorů. Takto realizované filtry bývají často integrované do jediného pouzdra a potřebují minimum externích komponent. Mezi jejich výhody patří nulový drift a jednoduchá konfigurovatelnost. Na druhou stranu, problém těchto filtrů je průnik hodinového signálu do výstupu [6].



Obrázek 5.4. Spínaný filtr.

5.3.2 Spojité filtry

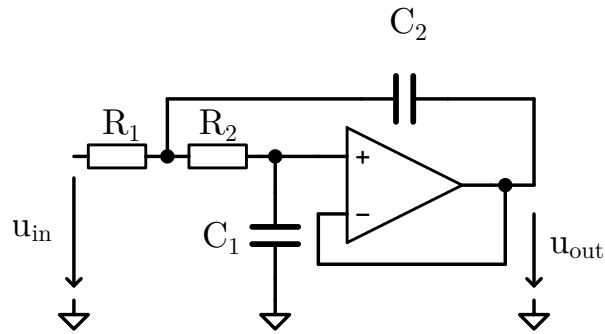
Další možností jsou spojitě, tj. analogové filtry. Nejjednodušším typem je RC článek. Filtry vyšších řádů se již realizují jako aktivní filtry. Nejčastěji se používá jedna ze dvou topologií: Sallen-Key nebo filtr s vícenásobnou zpětnou vazbou MFB (Multiple FeedBack) [7]. Pro další zvýšení řádu filtru je lze řadit kaskádně.

Topologie Sallen-Key je vhodná pro filtry se zesílením 1 a nízkým Q .

Topologie vícenásobné zpětné vazby je vhodná pro filtry s vysokým zesílením a vysokým Q .

Q určuje zvlnění amplitudové charakteristiky kolem zlomové frekvence. Filtry s vysokým Q mají ostrý nástup u zlomové frekvence, ale také vysoké zvlnění.

Jelikož v naší aplikaci chceme dosáhnout co nejplošší amplitudové charakteristiky v propustném pásmu, jsou vhodné filtry s nízkým Q a tedy filtry topologie Sallen-Key. Schéma filtru druhého řádu typu dolní propust topologie Sallen-Key je zobrazeno na obrázku 5.5.

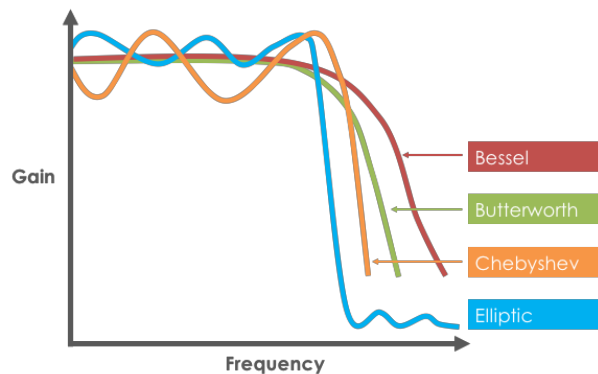


Obrázek 5.5. Dolní propust topologie Sallen-Key.

5.3.3 Typ filtru

Samotný filtr lze vhodnou volbou prvků nastavit pro různé požadované parametry jako je zlomová frekvence, strmost nástupu filtru nebo zvlnění v propustném pásmu.

V této aplikaci je kladen důraz na linearitu a maximální strmost. Svými parametry je tedy nevhodnější filtr typu **Butterworth**. Tento typ poskytuje maximální strmost při zachování nulového zvlnění v propustném pásmu. Porovnání amplitudových charakteristik jednotlivých typů filtru je na obrázku 5.6.



Obrázek 5.6. Porovnání amplitudových charakteristik typů filtrů [8].

5.4 Digitalizace výstupního signálu převodníku

Pro digitalizaci signálu s vysokým rozlišením je svými parametry vhodný především $\Sigma - \Delta$ AD převodník.

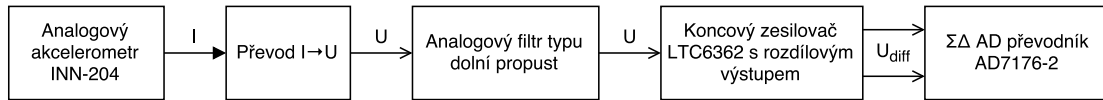
5.4.1 $\Sigma - \Delta$ AD Převodník

Tento typ převodníků může dosahovat rozlišení i 32 bitů¹. Rozlišení je závislé na době převodu. Lze tak docílit vysokých rychlostí nebo vysokého rozlišení s jediným obvodem. Dalším rysem je převod vstupního napětí po celou dobu měření. Tyto převodníky nemívají vzorkovací jednotku, která by po dobu převodu držela vstupní napětí rovné hodnotě v době vzorkování. Díky tomu lze vhodnou délkou převodu potlačit různá okolní rušení. [9–10]

¹ Například ADS1282 z minulé veže jednotky.

5.5 Návrh modulu pro předzpracování a digitalizaci signálu

S využitím poznatků z předchozích kapitol byl navržen modul s AD převodníkem. Každý akcelerometr má vlastní modul, který se stará o jeho napájení, filtraci a digitalizaci signálu. Uspořádání jednotlivých bloků digitalizačního modulu je na obrázku 5.7.



Obrázek 5.7. Blokové schéma zpracování signálu z akcelerometru.

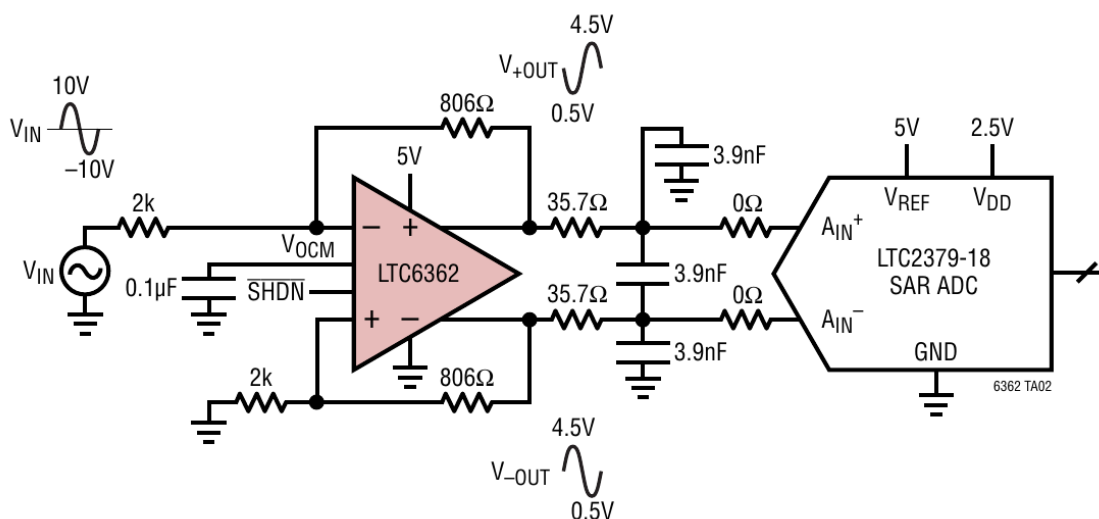
Z možných způsobů převodu napětí na proud byl zvolen rezistor. Jeho výhody převyšují ostatní řešení: nezvyšuje spotřebu, jednoduše lze omezit výstupní rozsah akcelerometru a nepřidává tolik šumu jako aktivní řešení.

Filtr typu dolní propust je realizován jako aktivní filtr topologie Sallen-Key, jenž je řazen kaskádně pro dosažení většího útlumu nad zlomovou frekvencí. Hodnoty pasivních součástek filtru byly vypočítány pomocí webového nástroje¹.

Jako AD převodník byl vybrán obvod AD7176-2. 24bitový, $\Sigma - \Delta$, se synchronní sériovou komunikací. Oproti převodníku z předchozí verze má větší vstupní rozsah, nižší cenu a menší pouzdro. Zároveň disponuje vnitřní 2,5V referencí.

Vybraný převodník má vstupní rozsah $\pm V_{ref}$. Při maximálním referenčním napětí 5V je jeho vstupní rozsah $\pm 5V$. Toto napětí může být mezi jeho rozdílovými vstupy, zároveň se musí napětí na vstupech vůči zemi nacházet v rozsahu napájení převodníku. Pro převod a napěťový posun vstupního napětí slouží zesilovač s rozdílovým výstupem LTC6362[11]. Referenční zapojení zesilovače je uvedeno na obrázku 5.8.

Na přesnost měření teploty uvnitř akcelerometru nejsou kladeny tak vysoké nároky jako je tomu u zrychlení. Proto je digitalizace proudového výstupu pro měření teploty prováděna mimo desku akcelerometru a na ní je ponechán pouze jednoduchý převodník z proudu na napětí, který zároveň řeší posun signálu. Díky tomu je veškerý čas AD převodníku vyhrazen pro měření výstupního signálu z akcelerometru.



Obrázek 5.8. Referenční zapojení zesilovače LTC6362[11].

¹ <http://www.beis.de/Elektronik/Filter/ActiveLPFilter.html>

5.6 Realizace

Každý modul je realizován ze dvou samostatných desek plošných spojů. Díky této koncepci se tak uvolnilo místo, které bylo při jednodeskovém řešení obsazeno montážními šrouby akcelerometru. Při následném velkém navýšení komponent tak nebylo nutné desky příliš zvětšovat oproti předchozí verzi.

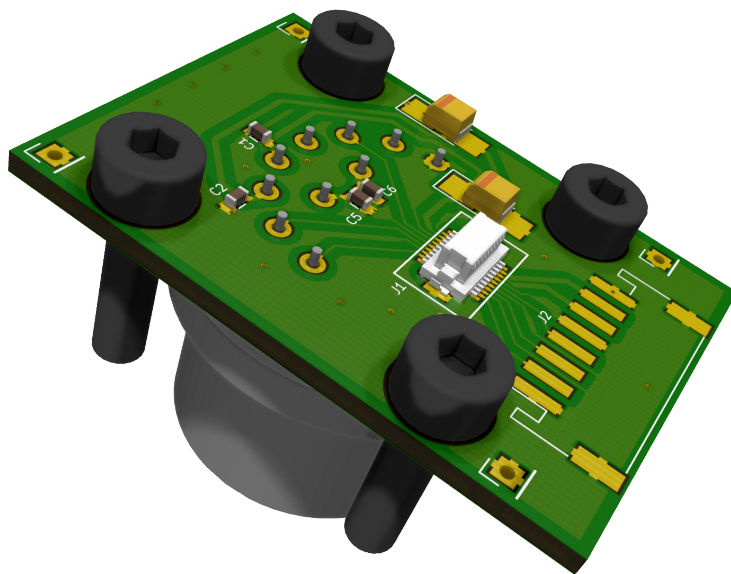
Nové řešení by mělo zamezit potřebě odpajování senzorů v případě změn v elektronice, které opakovaným tepelným namáháním trpí.

5.6.1 DPS akcelerometru

Dvouvrstvá deska plošných je spojů připájená přímo k senzoru a nese pouze filtrační kondenzátory na napájení a konektor pro připojení desky s další elektronikou. V případě změn pak stačí odpájet 4 montážní sloupky v rozích a připojenou desku s elektronikou jednoduše vyměnit.

Navíc je přidána možnost osazení konektoru pro přímé kabelové připojení senzoru pro případ kompletního oddělení signálové a digitalizační části od senzoru.

3D náhled této desky společně s akcelerometrem a montážními šrouby je na obrázku 5.9. Reálná deska připájená k senzoru je zachycena ve spodní části obrázku 5.11.



Obrázek 5.9. Deska akcelerometru.

5.6.2 DPS s převodníkem

Druhá deska plošných spojů je čtyřvrstvá a obsahuje veškerou elektroniku potřebnou ke předzpracování analogového signálu ze senzoru a převod na digitální.

Regulaci symetrického napájení zajišťuje dvojitý regulátor s nízkým úbytkem napětí LT3032 [12]. Použita varianta disponuje nastavitelným výstupním napětím pro případné doladění. Výstupní napětí regulátoru je nastaveno na $\pm 15V$ podle doporučení z katalogového listu akcelerometru. Zápornou větev využívá jen senzor a filtr. Kladná větev navíc napájí 5V regulátor a napětovou referenci AD převodníku. Regulátor pro logiku převodníku má výstupní napětí 3,3V a je připojen přímo na vstup kladného napájení, aby se špičkové proudové odběry nepřenesly do regulované kladné napájecí větve.

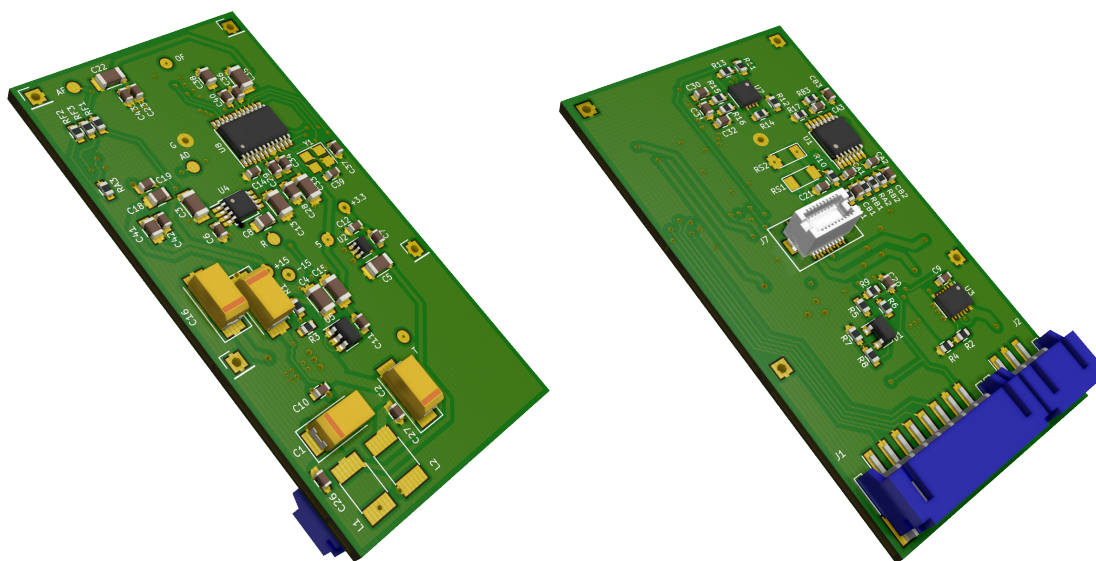
Filtr - dolní propust, topologie Sallen-Key typu Butterworth je postaven na čtyřnásobném operačním zesilovači AD8624 [13]. Tento zesilovač byl zvolen kvůli nízkému celkovému šumu. Jsou využity tři ze čtyř zesilovačů, ze kterých je složen filtr 6. řádu. Propojkami lze vybírat řád použitého filtru. Možné konfigurace jsou 0., 4. a 6. Při volbě nulového řádu je filtr zcela přemostěn a nemusí být vůbec osazen. Tato konfigurovatelnost byla vytvořena kvůli ověření vhodného řádu filtru. Při přemostění filtru je možné osadit jednoduchý RC článek jako dolní propust prvního řádu.

Výstup filtru je přiveden do zesilovače s rozdílovým výstupem LTC6362[11]. Ten převádí vstupní signál $\pm 12,5V$ vztažený vůči zemi na rozdílový $\pm 5V$ se středem na 2,5V. Toto střední napětí je získáno z vnitřní reference AD převodníku.

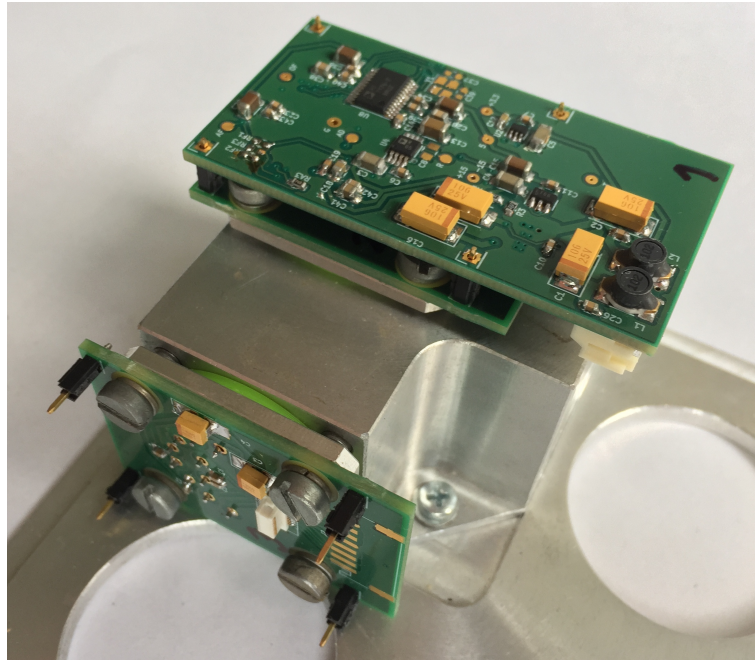
Mimo elektroniku pro zpracování a digitalizaci signálu z akcelerometru jsou na desce pomocné obvody pro převod proudového výstupu senzoru teploty uvnitř akcelerometru na napětí. O digitalizaci se pak stará AD převodník, který je součástí mikrokontroléru na řídicí desce.

Pro jednodušší oživování a ladění byly na desku umístěny testovací body, ke kterým lze snadno připojit měřicí přístroje. Tyto testovací body se nacházejí na všech napájecích větvích a po cestě signálu od snímacího rezistoru až k AD převodníku.

Na obrázcích 5.10 je vidět 3D náhled desky se všemi obvody potřebnými ke zpracování a převodu signálu. Obrázek 5.11 pak zachycuje již osazené desky v sestavě s akcelerometrem. Schémata obou desek se nachází v příloze C.



Obrázek 5.10. Deska zpracování signálu nesoucí AD převodník, filtr a regulátory.



Obrázek 5.11. Osazené desky akcelerometru.

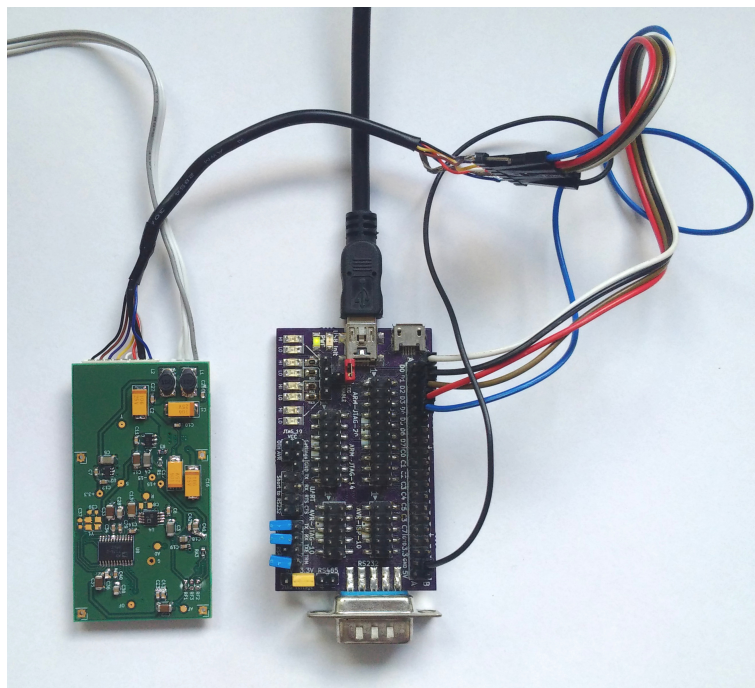
5.7 Oživení

První sada desek byla osazována postupně, aby bylo možné ověřit funkčnost jednotlivých bloků. Pokud by nastaly problémy s napájením, nehrozilo by poškození dalších komponent. Nejdříve byl osazen stabilizátor symetrického napájení. Výstupní napětí byly v rozsahu 1% od plánovaných $\pm 15\text{V}$. Stabilizátor kladných 5V byl osazen a otestován hned poté.

Další osazenou a testovanou částí byl zesilovač s rozdílovým výstupem. Bylo nezbytné jej osadit jako jeden z prvních obvodů, protože pouzdro QFN lze pájet jedině horkým vzduchem a hrozilo by odpájení okolních součástek. Po osazení potřebných pasivních součástek k jeho funkci byl otestován přivedením signálu z generátoru na vstup a připojením multimetru mezi rozdílové výstupy. Zesilovač pracoval dle očekávání a se zesílením přibližně 0,4.

Následovalo osazení napěťové reference, AD převodníku a stabilizátoru pro digitální část AD převodníku společně se všemi pasivními součástkami potřebnými ke správné funkci tohoto bloku. Pro testování komunikace byla použita deska s obvodem FT2232H, který nativně podporuje komunikaci po rozhraní SPI a připojuje se k počítači přes sběrnici USB. Elektronika při ožívování je na obrázku 5.12. Komunikace fungovala bez problémů.

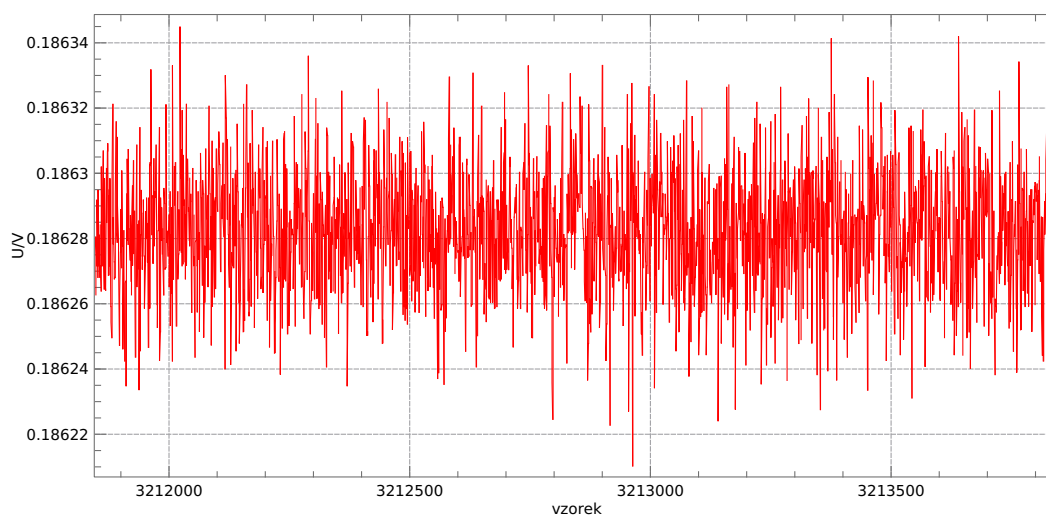
Posledním osazeným funkčním blokem byl antialiasingový filtr. Po jeho osazení a zapojení do obvodu nenastaly žádné komplikace.



Obrázek 5.12. Digitalizační deska připojená k počítači pomocí převodníku FT232 na vlastní vývojové desce.

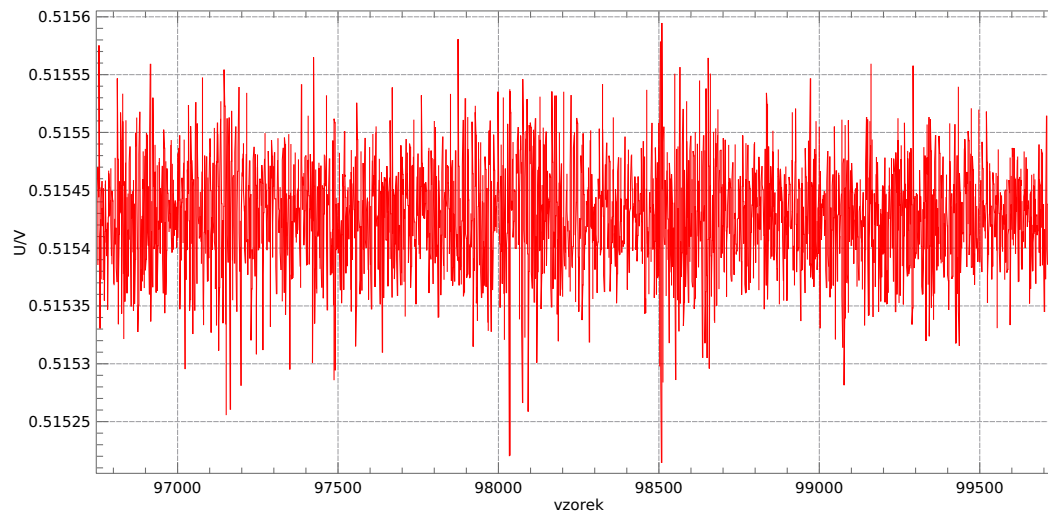
5.8 Testování

Jakmile byla ověřena funkčnost jednotlivých bloků signálové a digitalizační elektroniky, bylo ji možné začít testovat jako celek. Pro testování byla deska napájena z laboratorního zdroje a o vyčítání dat z AD převodníku a přenos do PC se starala vývojová deska Nucleo-64 s mikrokontrolérem STM32L475. Na obrázku 5.13 je vidět průběh měřených dat, kdy byl vstup odpojen a jedná se tedy pouze o šum elektroniky. Při měřeném šumu o velikosti přibližně $60\mu\text{V}_{pp}$ a rozsahu $\pm 5\text{V}$ vychází dynamický rozsah 104dB.

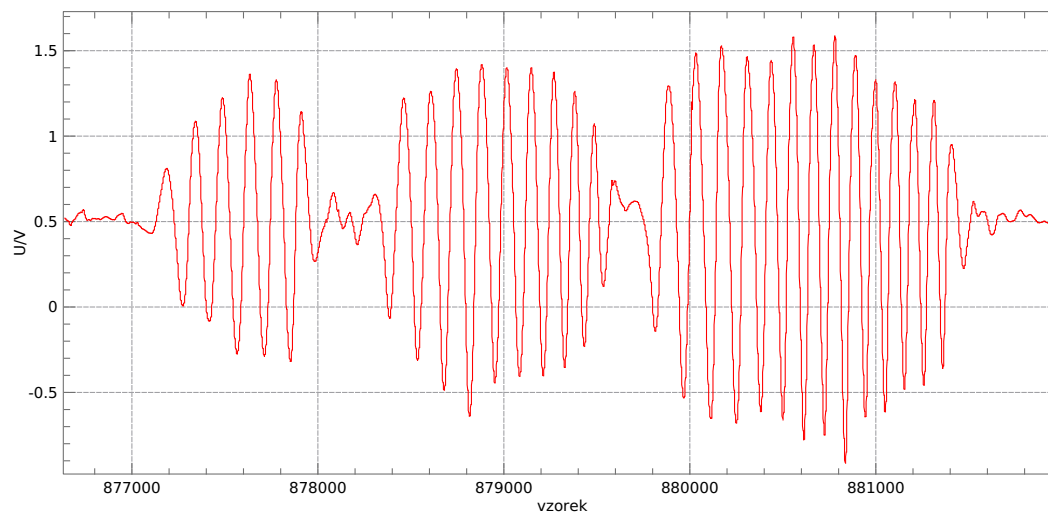


Obrázek 5.13. Šum elektroniky při odpojeném akcelerometru. Délka záznamu 2s.

Pro testování s připojeným akcelerometrem, byla elektronika společně se senzorem umístěna na zeď budovy ČVUT. Toto nelze považovat za ideální klidové testovací podmínky kvůli vibracím nesoucím se celou budovou. Pravděpodobně v důsledku těchto podmínek stoupl měřený šum na přibližně $150\mu\text{V}_{pp}$. Změřená data jsou vidět na obrázku 5.14. Obrázek 5.15 zachycuje výstup akcelerometru při kmitavém pohybu. Průběh je spíše demonstrativního charakteru, protože vstupem nebyl přesně definovaný pohyb. Převod napětí na zrychlení ještě nebyl kalibrován, a proto je všude na ose Y uvedeno měřené napětí.



Obrázek 5.14. Měřený výstup z akcelerometru v klidu. Délka záznamu 2s.



Obrázek 5.15. Měřený výstup z akcelerometru v pohybu.

Kapitola 6

Mikroprocesorová deska

Mikroprocesorová deska slouží jako centrální uzel celé jednotky. Jsou k ní připojeny všechny senzory a přijímač GNSS. Dále je přes ní distribuováno veškeré napájení. Jedna hrana desky je vyhrazena pro konektory externích periférií.

6.1 Mikrokontrolér STM32F765

Jako řídicí procesor byl vybrán mikrokontrolér STM32F765 [14]. Je to mikrokontrolér architektury ARM Cortex-M7. Jádro M7 je nejvýkonnější z celé rodiny jader pro mikrokontroléry. Disponuje výpočetním výkonem až 462 DMIPS, instrukční sadou s DSP instrukcemi a výpočetní jednotku pro práci s čísly s plovoucí desetinnou čárkou (FPU) s dvojitou přesností. Mikrokontrolér dosahuje maximální frekvence 216 MHz. Takto výkonný mikrokontrolér byl vybrán kvůli dostatečné výpočetní rychlosti pro náročné algoritmy jako je Kalmanův filtr a RTK.

6.2 GNSS Přijímač u-blox NEO-M8P

Novou periférií této verze elektroniky je GNSS přijímač NEO-M8P[15] od výrobce u-blox¹, který je nyní umístěn na desce s mikrokontrolérem oproti původní verzi, kde se připojoval externě přes rozhraní RS-232. Přijímače 8. generace mají zdvojenou vysokofrekvenční část a díky tomu jsou schopné zpracovávat signál z více GNSS systémů. Písmeno P v názvu značí určení přijímače pro aplikace, kde se očekává vysoká přesnost. S využitím druhého modulu jako bazové stanice a jejich propojením, lze použít vnitřní RTK přijímače pro zvýšení přesnosti měření pozice. Alternativou k tomuto uzavřenému řešení je výstup hrubých dat z přijímače, který lze zpracovávat na počítači s využitím opensource knihovny RTKlib².

6.3 Návrh

Na celé desce je kromě mikrokontroléru a GNSS přijímače multiplexor pro přepínání sběrnice mezi jednotlivými akcelerometry. Design sběrnice SPI umožňuje přepínat mezi jednotlivými zařízeními za použití jednoho adresního vodiče pro každé zařízení. Tento princip zde nelze aplikovat, protože datové výstupy slouží i pro indikace ukončení měření a je tedy nutné sledovat datový výstup každého modulu s akcelerometrem samostatně.

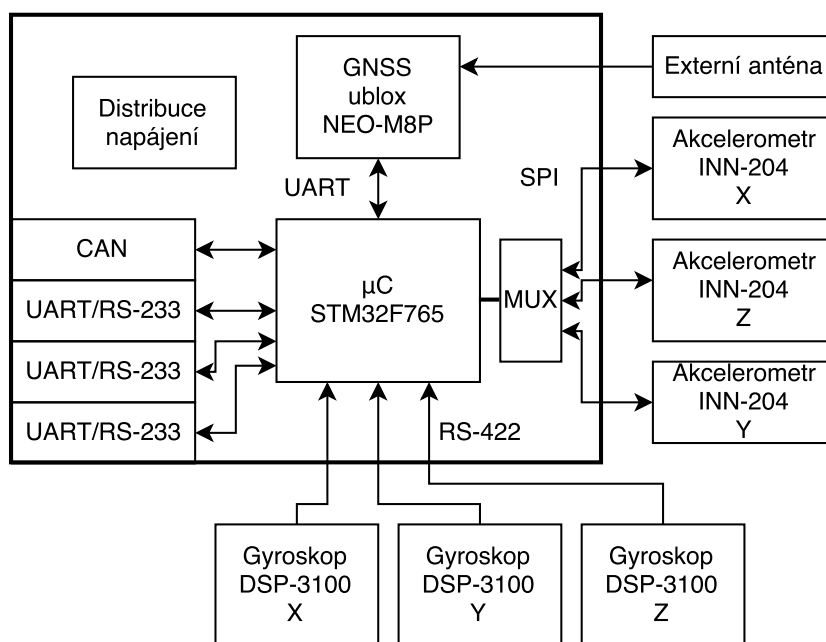
Při návrhu části s GNSS modulem bylo z velké části převzato rozložení komponent, zemí a především vysokofrekvenční části z manuálu pro 7. generaci modulů [16]. Parametry spoje mezi anténou a modulem byly vypočítány z vlastností použitého dielektrika tak, aby byla zachována impedance 50Ω.

¹ <https://www.u-blox.com/>

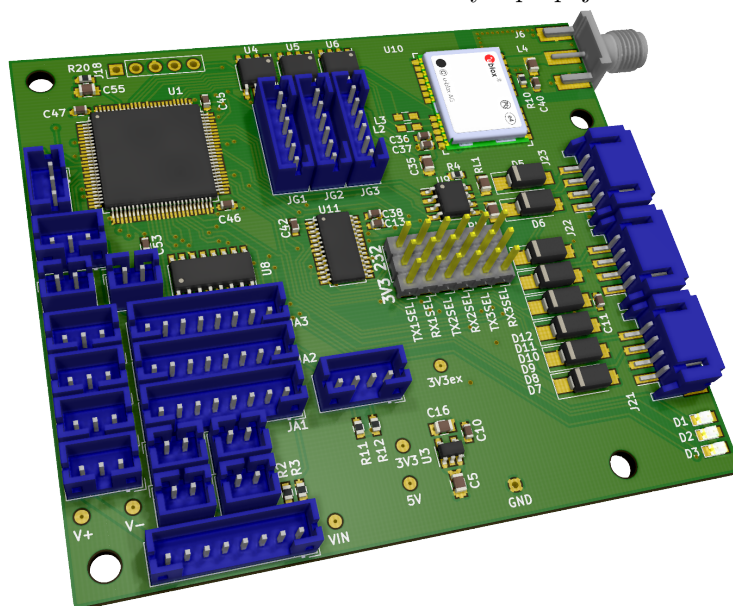
² <http://www.rtklib.com/>

Pro komunikaci s externími periferiemi jsou vyvedeny 3 sériové linky UART. K jednotce bude připojen externí magnetometr a případně i bezdrátový komunikační modul pro propojení dvou GNSS modulů a využití jejich vnitřní RTK funkcionality. Třetí sériová linka zůstává volná pro ladící účely. U sériových linek lze vybrat, zda používají logické úrovně mikrokontroléru nebo úrovně RS-232[17]. Pro komunikaci s nadřazeným systémem je určena sběrnice CAN. Třetím externě přístupným rozhraním je SPI. Jeho využití zatím není určeno. V budoucnu může například sloužit pro připojení dalšího bezdrátového rozhraní. Všechny komunikační linky mají chráněné vstupy proti napětovým špičkám ESD výbojů. Celkové schéma se nachází v příloze D.

Blokové schéma mikroprocesorové desky, připojení senzorů a externích periferií je na obrázku 6.1. 3D náhled mikroprocesorové desky je pak na obrázku 6.2



Obrázek 6.1. Blokové schéma řídicí desky a propojení se senzory.



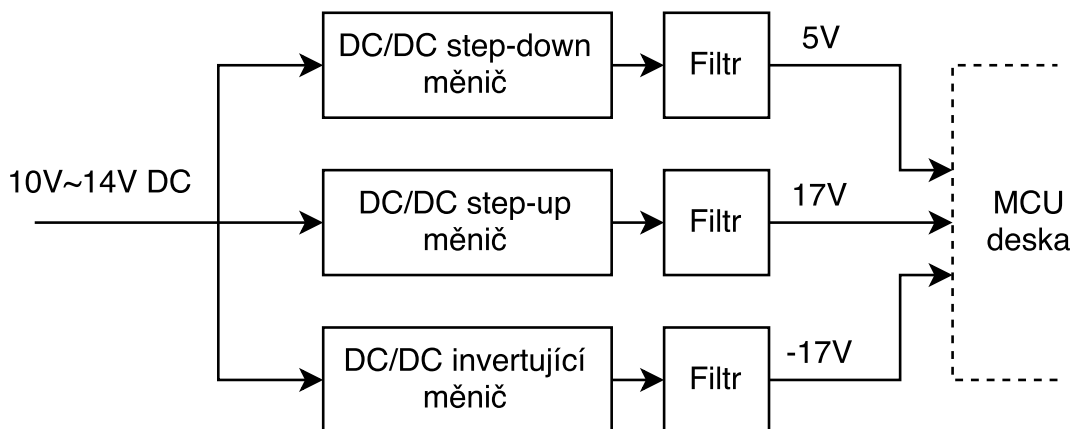
Obrázek 6.2. 3D náhled mikroprocesorové desky.

Kapitola 7

Napájení jednotky

Napájecí část jednotky bude realizována jako samostatný napájecí modul. Předpokládané vstupní napětí je 12V. Výstupní napětí 5V bude hlavní napájení pro desku s mikrokontrolérem a pro všechny periferie nevyžadující symetrické napájení. Výstup $\pm 17V$ je určen pro akcelerometry a analogovou elektroniku zpracovávající signál z nich. Očekávané zatížení 5V větve je do 15W, zejména kvůli odběru gyroskopů. Zatížení symetrických větví by nemělo přesáhnout 3W na větev. Předpokládané blokové schéma je zachyceno na obrázku 7.1.

Tato napájecí deska je v současné době ve fázi návrhu, protože byla většina času věnována práci na digitalizační elektronice k akcelerometrům.



Obrázek 7.1. Blokové schéma napájecí desky.

Kapitola 8

Závěr a budoucí vývoj

Cílem této bakalářské práce byl návrh a výroba nové elektroniky pro inerciální jednotku s vysoce citlivými senzory. Nejvíce byl kladen důraz na zpracování a digitalizaci signálu z analogových akcelerometrů. Výsledná elektronika zpracovávající tento signál dosahuje dynamického rozsahu 104dB. Cílem bylo maximální přiblížení se k dynamickému rozsahu 123dB, který je dán minimální rozlišovací schopností analogového akcelerometru $5\mu\text{g}$ a pracovním rozsahem $\pm 5\text{g}$.

Z analýzy a testů na zhotovené elektronice bylo zjištěno, že nejpravděpodobnějším místem vzniku rušení je koncový zesilovač s rozdílovým výstupem. Z tohoto důvodu je v současné době řešena modifikace digitalizační části elektroniky, kde bude koncový zesilovač realizován z jednotlivých operačních zesilovačů. Budou i nahrazeny ostatní operační zesilovače za typ s nulovým driftem a offsetem. Mělo by se tak předejít případným vlivům změn teploty na elektroniku.

Řídicí deska s mikrokontrolérem byla v době odevzdání této práce ve fázi výroby a proto ještě nebyla otestována. Kromě GNSS přijímače nenese tato deska žádné kritické bloky a tudíž nejsou očekávány komplikace.

Napájecí část jednotky byla v době dokončení této práce ve fázi návrhu. Deska s napájecími obvody bude značně ovlivněna změnami v nosné konstrukci elektroniky a bude jí přizpůsobena.

Literatura

- [1] Neubrex. *FOG Principle*. 2007.
<http://www.neubrex.com/htm/applications/gyro-principle.htm>.
- [2] ČVUT. *NavLIS - Navigační skupina laboratoře Leteckých Informačních Systémů*. 2017.
<https://www.fel.cvut.cz/cz/vv/tymy/navlis.html>.
- [3] Texas Instruments. *Ultra High Resolution Delta Sigma ADC with PGA for Seismic and Energy Exploration*. 2015.
<http://www.ti.com/lit/gpn/ads1282>.
- [4] Steven Xie Analog Devices. *Practical Filter Design Challenges and Considerations for Precision ADCs*. 2016.
<http://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/practical-filter-design-precision-adcs.html>.
- [5] Ryan Andrews Texas Instruments. *Aliasing in ADCs: Not all signals are what they appear to be*. 2015.
https://e2e.ti.com/blogs_/b/precisionhub/archive/2015/09/04/aliasing-in-adcs-not-all-signals-are-what-they-appear-to-be.
- [6] Paul Horowitz a Winfield Hill. *Art of Electronics THIRD EDITION*. Cambridge University Press, 2015. ISBN 0521809266.
- [7] Texas Instruments. *Chapter 16 Active Filter Design Techniques*. 2008.
<https://focus.ti.com/lit/ml/sloa088/sloa088.pdf>.
- [8] Bliley Technologies. *Filter Topology Face Off: A closer look at the top 4 filter types*. 2016.
<http://blog.bliley.com/filter-topology-face-off-a-closer-look-at-the-top-4-filter-types>.
- [9] Bonnie Baker Texas Instruments. *How delta-sigma ADCs work, Part 1*. 2011.
<http://www.ti.com/lit/an/slyt423a/slyt423a.pdf>.
- [10] Bonnie Baker Texas Instruments. *How delta-sigma ADCs work, Part 2*. 2011.
<http://www.ti.com/lit/an/slyt438/slyt438.pdf>.
- [11] Linear technology. *Precision, Low Power Rail-to-Rail Input/Output Differential Op Amp/SAR ADC Driver*. 2012.
<http://www.linear.com/docs/41228>.
- [12] Linear Technology. *Dual 150mA Positive/Negative Low Noise Low Dropout Linear Regulator*. 2013.
<http://www.linear.com/docs/29070>.
- [13] Analog Devices. *Low Power, Precision Rail-to-Rail Output Quad Op Amp*. 2013.
http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8622_8624.pdf.
- [14] STMicroelectronics. *High-performance and DSP with FPU, ARM Cortex-M7 MCU with 1 Mbyte Flash, 216 MHz CPU, Art Accelerator, L1 cache, SDRAM, DFSDM*.

2016.

<http://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f765vg.pdf>.

[15] u-blox. *u-blox M8 High Precision GNSS Modules*. 2017.

https://www.u-blox.com/sites/default/files/NEO-M8P_DataSheet_%28UBX-15016656%29.pdf.

[16] u-blox. *MAX-7 / NEO-7 u-blox 7 GNSS modules Hardware Integration Manual*. 2014.

https://www.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/MAX7-NEO7_HIM_%28UBX-13003704%29.pdf.

[17] Wikipedia. *RS-232*. 2017.

<https://en.wikipedia.org/wiki/RS-232>.

Příloha A

Katalogový list gyroskopu

DSP-3100



High-performance, Single-axis Fiber Optic Gyro



Key Features

- Industry standard 26-pin connector
- Single-axis, modular design for multi-axis configurations
- Patented Digital Signal Processing (DSP)
- Exceptional bias stability and linearity
- Industry standard RS-422 communications
- Commercial off-the-shelf (COTS) product

Applications

- Antenna/radar/optics stabilization
- Gun/turret stabilization
- IMU, GPS/INS integration
- AHRS integration

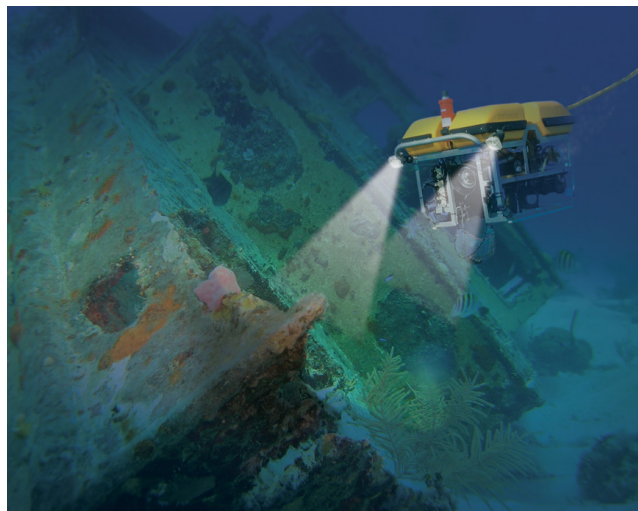


Airborne surveying applications use KVH's DSP-3100 to provide the stabilisation necessary to produce clear images.

Increased Accuracy in a Smaller Form Factor

Designed for demanding applications requiring high-speed data output, the KVH DSP-3100 offers a powerful high-speed RS-422 interface with 1000 Hz asynchronous in a package more compact than the KVH DSP-3400. With its industry-standard Samtec 26-pin connector, it offers a versatile package ideal for installations with tighter installation requirements while not sacrificing performance, reliability, or durability.

The entire DSP-3000 series uses KVH's patented Digital Signal Processing (DSP) electronics. KVH's breakthrough DSP design overcomes the limitations of analog signal processing, virtually eliminating temperature-sensitive drift and rotation errors. In addition, KVH's DSP technology offers significant performance improvements in such critical areas as scale factor and bias stability, scale factor linearity, turn-on to turn-on repeatability, and maximum input rate. Exceptional low noise (ARW), insensitivity to cross-axis error, and shock and vibration robustness make the DSP-3000 series a perfect fit for demanding industrial applications. This performance, combined with the inherent simplicity and reliability of our mature all-fiber optical circuit, establish the DSP-3000 series as an affordable, outstanding solution for motion sensing, stabilization, navigation, and precision pointing applications.



Underwater Remotely Operated Vehicles (ROVs) depend on the KVH DSP-3100 for precise navigation information to complete their tasks.

Precision, Performance, and Price

Fabricated from KVH's proprietary E-Core® polarization maintaining fiber, the KVH DSP-3100 delivers superior precision and reliable performance at a lower cost than other comparable fiber optic and mechanical gyroscopes. Its temperature stability and repeatability make it particularly well-suited for precision stabilization, GPS integration, and

multi-axis tactical-grade inertial measurement systems. The noise spectrum of the DSP-3100 is exceptionally flat, lacking the discrete noise components of mechanical gyros. With no moving parts to maintain or replace, the DSP-3100 lasts longer, functions better, and yields significant product life cycle savings.

Specifications	KVH DSP-3100 Single-axis Fiber Optic Gyro
	Digital
Input Rate (max)	±375°/sec
Bias Instability (25°C)	≤1°/hr, 1σ
Bias vs. Temperature (≤1°C/min)	≤6°/hr, 1σ
Bias Offset (25°C)	±20°/hr
Scale Factor Non-linearity (max rate, 25°C)	≤500 ppm, 1σ
Scale Factor vs. Temperature (≤1°C/min)	≤500 ppm, 1σ
Angle Random Walk (25°C)	≤0.067°/√hr (≤4°/hr/√Hz)
	Digital
Electrical/Mechanical Interface	Digital
Bandwidth (-3 dB)	≥440 Hz
Initialization Time (valid data)	≤5 secs
Data Interface	Asynchronous RS-422
Baud Rate	375 Kbps
Data Rate	1000 Hz
	Digital
Physical Specifications	Digital
Dimensions (max)	87.9 mm L x 66.0 mm W x 24.9 mm H (3.5" x 2.6" x 1.0")
Weight (max)	0.2 kg (0.44 lbs)
Power Consumption	3 W (max), 1.25 W (typical)
Input Voltage	+5, ±10% VDC
	Digital
Environmental Specifications	Digital
Temperature (operating)	-40°C to +75°C (-40°F to +167°F)
Shock (operating)	40 g, 10 msec, half-sine
Vibration (operating)	8 g rms, 20-2000 Hz
MTBF	>20,000 hours

For detailed interface control drawings (ICD) and technical manuals on this product, please visit www.kvh.com/DSP3100 and click on the **Manuals** tab.

DS_DSP3100_7_15



KVH Industries, Inc. • 50 Enterprise Center • Middletown, RI 02842 • U.S.A. • Phone: +1 401 847-3327 • Fax: +1 401 845-2410

©2009-2015, KVH Industries, Inc.

Specifications subject to change without notice

KVH and E-Core are registered trademarks of KVH Industries, Inc.

Protected by one or more of the following U.S. and foreign patents: US 8,866,564 US 7,317,847, US 6,763,153, US 6,718,087, US 6,707,558, US 6,429,939, US 6,370,289 B1, US 6,134,356, US 6,041,149, US 5,768,462, US 5,739,944, US 5,552,867. Additional patents pending.

Příloha B

Katalogový list akcelerometru



Quartz Accelerometer INN-204
Preliminary Datasheet

Preliminary Datasheet

General description

INNLABS' INN-204 tactical-grade accelerometers are used in both commercial and military applications such as strap-down inertial navigation systems for aircraft, marine, land and other applications. Excellent performance of these accelerometers is achieved owing to proven quartz flexure technology. Implementation of the latest advances in technology and economy of scale enable us to set lower price compared to other analogue accelerometers. Another substantial advantage is the fact that INNLABS does not require export licenses, so the purchasing process is very fast and hassle-free. These factors make INN-204 the №1 accelerometer on the tactical navigation market today.



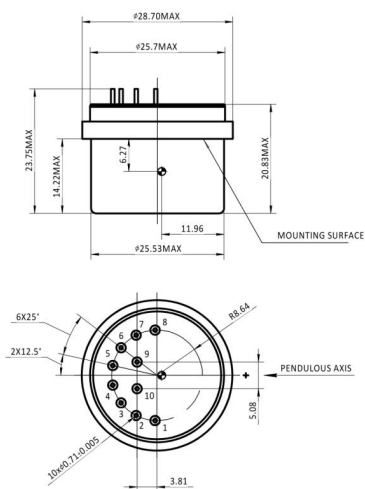
Features

- Tactical performance
- High Input Range
- High stability under temperature changes
- Analog output
- Compact design
- INNLABS does not require export licenses

Applications

- Inertial Navigation Systems for helicopters, manned and unmanned (UAV) aircrafts
- Navigation/ orientation/ gyrocompassing systems for naval vessels, ships, submarines, ROV, AUV
- Guidance systems for strategic or tactical missiles
- Orientation systems for oil drilling industry

Accelerometer dimensions drawing (mm):



Technical parameters

Parameters	Units	Values
Input Range	g	±30
Bias	mg	<10
One Year Repeatability	µg	<200
Temperature Sensitivity	µg/degC	<100
Scale Factor	mA/g	1.23 ... 1.43
One Year Repeatability	ppm	<200
Temperature Sensitivity	ppm/degC	<200
Axis Misalignment	µrad	<2000
One Year Repeatability	µrad	<100
Non-linearity	µg/g ²	<100
Operating Temperature	degC	-55...+85
Vibration	g, Hz	25g @ 20...2000 Hz
Shock	g	250, 8ms
Resolution	µg	<5
Bandwidth	Hz	800
Current per Supply	mA	<16
Power @ ±15 VDC	mW	<480
Input Voltage	VDC	±12 ... ±18
Bias temperature model		Optional
SF temperature model		Optional
Size	mm	Ø 28.7 x 20.83
Weight	g	<50
Case Material		Stainless Steel

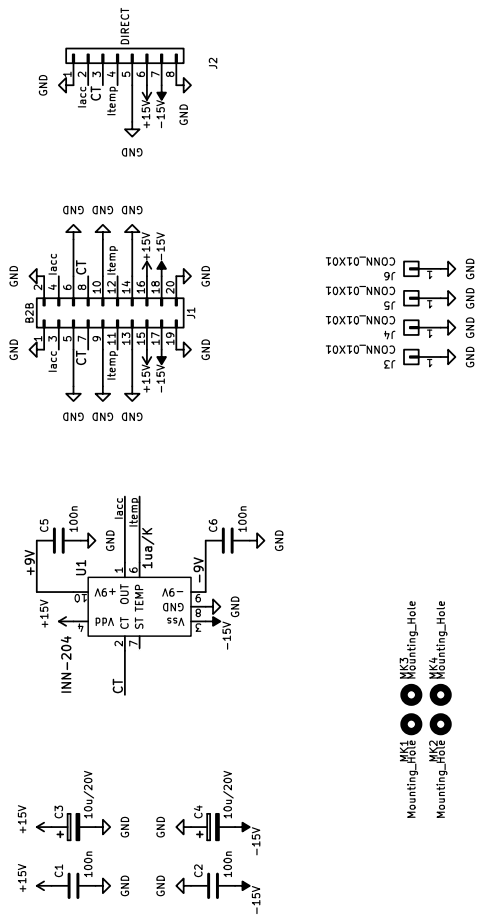
Connector PIN description:

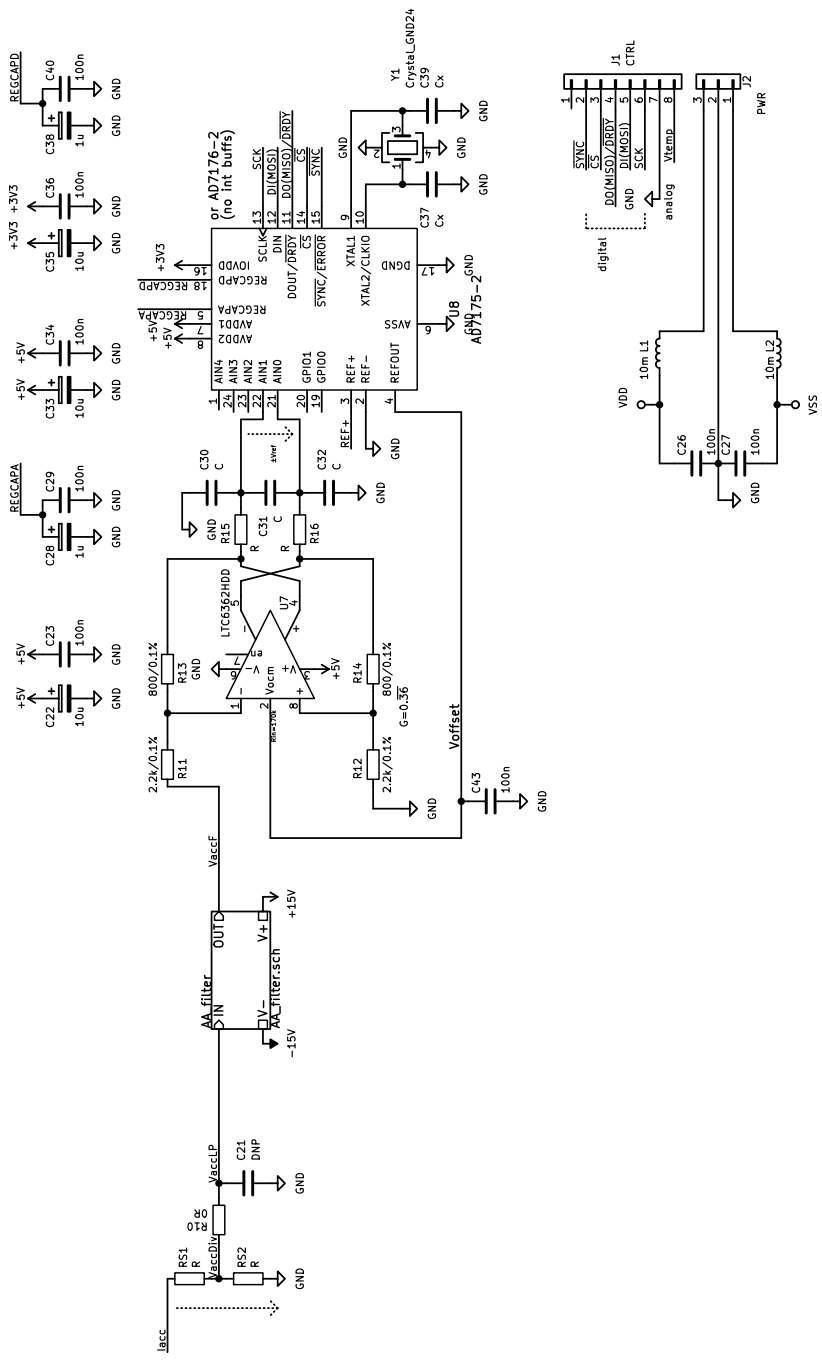
PIN	Signal
1	Signal out
2	Current torque
3	-12 to -18 VDC
4	+12 to +18 VDC
5	NC
6	Temperature sensor output
7	Voltage self test
8	Signal and power return
9	- 9VDC
10	+ 9VDC

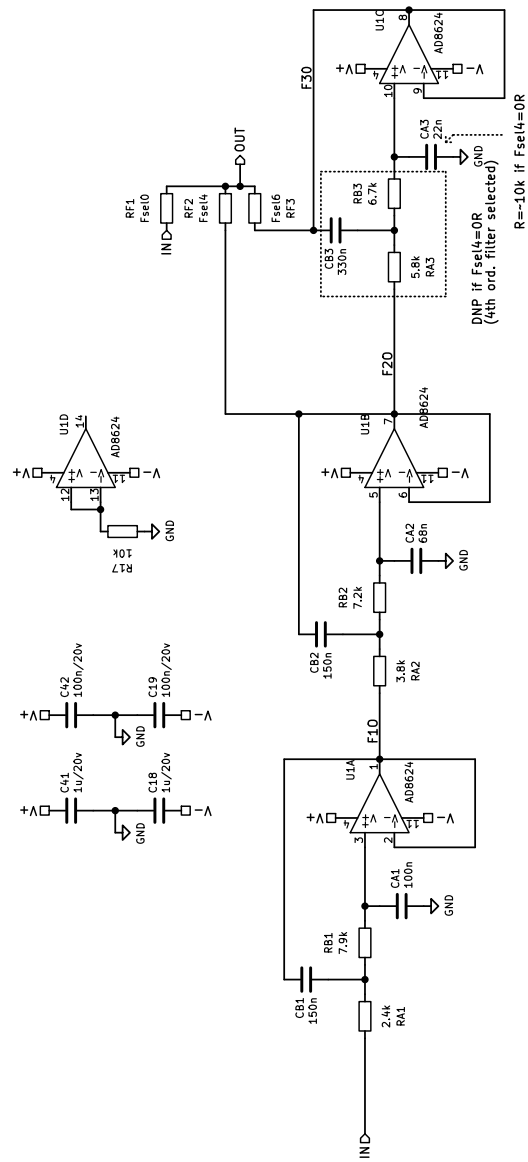
Disclaimer: the document is subject to change without notice. INNLABS reserves the right to make changes to any product or technology herein. INNLABS does not assume any liability arising out of the application or use of the product.

Příloha C

Schéma desek digitalizace akcelerometru







Příloha D

Schéma mikroprocesorové desky

SWD debug

