

UNIVERZITA PARDUBICE

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2017

Josef Jordán

Univerzita Pardubice

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Měření a analýza vibrací mechanické konstrukce anténního systému radaru

Josef Jordán

Diplomová práce

2017

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Josef Jordán**
Osobní číslo: **I15163**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komunikační a řídicí technologie**
Název tématu: **Měření a analýza vibrací mechanické konstrukce anténního systému radaru**
Zadávací katedra: **Katedra elektrotechniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

V teoretické části proveďte analýzu dostupných informací o souvislosti kmitů mechanických konstrukcí s fyzickým uspořádáním převodovek, motorů a s vlivem meteorologických podmínek. Zaměřte se na mechaniku pohonu anténních systémů radaru umístěných na věžích z kovových konstrukcí.

V praktické části navrhnete systém pro měření a analýzu mechanických kmitů konstrukce a vhodný přenos naměřených údajů do ovládacího počítače radaru, uvažujte, že v blízkosti antén radaru je silné pulsní elektromagnetické pole. Vzhledem k používaným technologiím na pracovišti se jako základní výpočetní a komunikační prvek předpokládá programovatelné pole typu Xilinx Zynq.

Funkci navrženého zařízení ověřte reálným provozem, proveďte rozbor naměřených hodnot a vyznačte a diskutujte body charakteristické pro danou konstrukci

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

1. RL2000/MSSR-1 system description ; interní dokumentace spol. ELDIS Pardubice, s.r.o.
2. Sensors, switches, and instrumentation for monitoring vibration in gearboxes. IMI Sensors [online]. b.r. [cit. 2015-05-23]. Dostupné také z: <https://www.imi-sensors.com/gearboxes.aspx>
3. ADIS16227 - Digital Triaxial Vibration Sensor with FFT Analysis and Storage. In: Analog Devices, Inc [online]. 2012 [cit. 2015-05-23]. Dostupné také z: http://www.analog.com/static/importedfiles/data_sheets/ADIS16227.pdf

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Jan Pidanič, Ph.D.

Katedra elektrotechniky

Datum zadání diplomové práce:

31. října 2016

Termín odevzdání diplomové práce:

12. května 2017



Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.
děkan



L.S.



Ing. Jan Pidanič, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 15. listopadu 2016

Prohlášení autora

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména ze skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 12. 08. 2017

Josef Jordán

Poděkování

Velice rád bych poděkoval společnosti Eldis Pardubice, s.r.o. za to, že mi umožnila a zároveň vytvořila podmínky pro kvalitní splnění všech požadavků na tomto projektu. Dále bych rád poděkoval Ing. Vladimíru Dufkovi za jeho nesmírnou pomoc při řešení mnohých problémů v průběhu zpracování tohoto projektu a mnohých dalších, se kterými se jistě budu setkávat při budoucím rozvoji této práce. V neposlední řadě bych také rád poděkoval oddělení konstrukce za rychlou realizaci a výrobu všech mechanických komponent. Na závěr bych rád poděkoval vedoucímu této práce panu Ing. Janu Pidaničovi, Ph.D. za jeho odbornou a stylistickou pomoc při psaní této diplomové práce.

Anotace

Tématem diplomové práce je návrh systému pro měření mechanických vibrací radarové antény a následným zpracováním těchto měření pomocí programovatelného pole Xilinx Zynq.

Klíčová slova

A/D převodník, Xilinx Zynq, měření vibrací, vibrační čidlo, spektrum, zesilovač

Title

Vibration measurement and analysis of mechanical design of the antenna radar system.

Annotation

The topic of this master thesis is design system for measuring mechanical vibrations of radar antenna and following processing of this measurement using programmable logic arrays Xilinx Zynq.

Keywords

ADC, Xilinx Zynq, vibration measurement, vibration sensor, spectrum, amplifier

Obsah

Seznam obrázků.....	8
Seznam tabulek.....	9
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK.....	10
Úvod.....	11
1 Teoretické předpoklady	11
1.1 Co to jsou vibrace	11
1.2 Proč měřit vibrace.....	12
1.3 Způsoby a metodika měření vibrací	12
1.4 Druhy akcelerometrů	13
1.4.1 Piezoelektrické akcelerometry.....	13
1.4.2 Piezorezistivní akcelerometry.....	14
1.4.3 Kapacitní akcelerometry.....	15
1.5 Diagnostika vibrací.....	16
1.5.1 Nesouosost rotorů.....	17
1.5.2 Excentrický rotor	18
1.5.3 Mechanické uvolnění.....	18
1.5.4 Ozubená soukolí	19
1.5.5 Kluzná a valivá ložiska.....	22
2 Technické zpracování.....	24
2.1 Výběr vibračního čidla	24
2.2 Návrh diferenčních zesilovačů	26
2.3 Návrh A/D převodníku	29
2.3.1 Princip sigma-delta převodníků.....	29
2.3.2 SPI komunikace	31
2.3.3 Programové řešení SPI komunikace.....	32

2.4	Návrh napájecích zdrojů	36
2.4.1	Návrh 5V a 3V3 zdroje.....	36
2.4.2	Návrh proudového zdroje pro senzory vibrací	37
2.5	Návrh obvodů komunikace.....	39
2.5.1	USB + LAN rozhraní.....	39
2.5.2	Optické rozhraní	40
2.5.3	Rozhraní RS232.....	41
2.6	Ochrana proti elektromagnetickému záření.....	42
2.7	Nadstavbové funkce	43
3	Zpracování výsledů	44
3.1	Měření při 5rpm.....	46
3.2	Měření při 10rpm.....	47
3.3	Měření při 15 rpm.....	48
3.3.1	Rotorová a zubová frekvence druhé převodové skříně	50
4	Závěr	52
	Literatura	54
	Seznam příloh	55

Seznam obrázků

Obrázek 1: Vibrace různě opotřebených částí motoru.....	13
Obrázek 2: Piezo. akcelerometr	14
Obrázek 3: Wheatstoneův můstek	14
Obrázek 4: Piezorezistivní akcelerometr	15
Obrázek 5: Diferenciální zapojení kondenzátorů	16
Obrázek 6: Druhy nesouosostí [6]	17
Obrázek 7: Spektrum nesouososti [6]	17
Obrázek 8: Excentrický motor	18
Obrázek 9: Frekvenční spektrum pohybu při mechanickém uvolnění [6].....	19
Obrázek 10: Ozubené soukolí.....	20
Obrázek 11: Frekvenční spektrum ozubeného soukolí.....	21
Obrázek 12: Důvody poruch ložisek	22
Obrázek 13: Typická spektra vibrací, pro různé opotřebenění ložisek [6].....	23
Obrázek 14: Zapojení PIEZO senzoru [7]	25
Obrázek 15: Diferencující zesilovač.....	26
Obrázek 16: Schematické zapojení zesilovačů	27
Obrázek 17: Závislost zisku na frekvenci.....	28
Obrázek 18: Blokový diagram sigma-delta modulátoru.....	29
Obrázek 19: Decimální filtr [8].....	30
Obrázek 20: Zapojení AD7175-2	30
Obrázek 21: Časové diagramy na SPI	31
Obrázek 22: Datová komunikace mezi Xilinx Zynq a A/D.....	32
Obrázek 23: Stavový diagram datové komunikace	34
Obrázek 24: Reálný průběh SPI komunikace zobrazený na osciloskopu.....	35
Obrázek 25: Schéma napájecích zdrojů.....	36
Obrázek 26: Náhradní schéma filtru BNX016-01	37
Obrázek 27: Schéma filtru pro A/D převodník a zesilovače	37
Obrázek 28: Zdroj konstantního proudu	38
Obrázek 29: Schéma zapojení pro LAN a USB konektor	39
Obrázek 30: Schéma zapojení optické komunikace	40
Obrázek 31: Princip komunikace na RS232 sběrnici	41

Obrázek 32: Schematické zapojení budiče pro RS232	42
Obrázek 33: Schematické propojení vibračního senzoru a krabičky zesilovačů	43
Obrázek 34: Schéma zapojení olejového čidla	43
Obrázek 35: Schéma zpracování úhlové informace a rychlosti větru	44
Obrázek 36: 5rpm svislé měření	46
Obrázek 37: 5rpm vodorovné měření	47
Obrázek 38: 10rpm svislé měření	48
Obrázek 39: 10rpm vodorovné měření	48
Obrázek 40: 15rpm svislé měření	49
Obrázek 41: 15rpm svislé měření	49
Obrázek 42: Detail spektra vodorovného měření	51

Seznam tabulek

Tabulka 1: Akcelerometr 780B	24
------------------------------------	----

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

A/D	Analogově digitální převodník
AIN	Analog Input – Analogový vstup
CIC	Cascaded Integrator-comb filter – Kaskádní Integrující-hřebenový filtr
CS	Chip Select
DC/DC	Direct Current/Direct Current
DIN	Data In – Vstupní data
DOUT	Data Out – Výstupní data
EMS	Electromagnetic Susceptibility – Elektromagnetická odolnost
FFT	Fast Fourier Transformation – Rychlá Fourierova Transformace
FIFO	First In First Out
LAN	Local Area Network
LSB	Least Significant Bit – Bit s nejnižší důležitostí
MISO	Master Input Slave Output
MOSI	Master Output Slave Input
MSB	Most Significant Bit – Bit s nejvyšším významem
PDM	Pulse-density modulation
RPM	Revolutions Per Minute – Otáčky za Minutu
SCLK	Serial Clock – Sériové hodiny
SPI	Serial Peripheral Interface – Periferní Sériová Komunikace
SNR	Signal to Noise Ratio – Poměr Signál Šum
SPS	Samples per Second – Vzorky za sekundu
USB	Universal Serial Bus – Univerzální Sériová linka

Úvod

V dnešní době se velice hledí na bezpečnost různých systémů, a to především v letecké dopravě. O tuto bezpečnost se primárně starají radary, které musí být velmi spolehlivé. Hlavním prvkem spolehlivosti radarových antén společnosti ELDIS Pardubice, s.r.o. je kompletní paralelizace zpracování signálu od přijímače, až po zobrazení v řídicí věži. I přes toto dvojitě zálohování je nutné sledovat stav životnosti těchto systémů. V případě selhání obou motorů nebo převodovek by radar oslepnul. Cílem této práce je provádět vibrodiagnostiku těchto částí a na základě naměřených dat se pokusit předpovědět budoucí závadu.

V první části se zaměřím na teoretický rozbor druhů vibrací a možnostmi jejich měření. Dále se zaměřím na rozbor spektra vibrací, jednotlivých mechanických částí převodových skříní.

V druhé části se zaměřím na návrh a měření těchto vibrací. Tato část bude obsahovat schematický návrh zesilovačů, zdrojů napájecího napětí a obvodů komunikace. Mozkem celého zařízení je mikropočítač Xilinx Zynq opatřený dvou jádrovým procesorem a programovatelným logickým polem. Veškeré zpracování signálu bude probíhat v tomto počítači, kde výstupními daty budou pouze hotová spektra naměřených vibrací.

1 Teoretické předpoklady

1.1 Co to jsou vibrace

Vibrace jsou mechanický pohyb okolo rovnovážného stavu měřeného stroje, konstrukce, nebo komponentu. Tyto vibrace mohou být periodické, například pohyb kyvadla, nebo náhodné, jako pohyb pneumatiky po vozovce. Rozlišujeme dva základní druhy vyjádření vibrací. První možnost vyjádření je v metrických jednotkách ($\frac{m}{s^2}$). Druhá je v jednotkách gravitační konstanty g , kde

$$g = 9.81 \frac{m}{s^2}. \quad (1.1)$$

Sledovaný objekt může vibrovat dvěma druhy:

- 1) Samovolné vibrace
- 2) Nucené vibrování

V prvním případě se samovolné vibrace mohou projevovat díky špatně, nebo volně uloženému objektu. Příkladem může být uhození do zábradlí. Ačkoliv tyto vibrace časem ustanou, předmět má tendenci vibrovat okolo své rezonanční frekvence. Pokud bude takovýto objekt ovlivňován i nepatrnými mechanickými kmity, které jsou blízko jeho rezonanční frekvenci, může dojít k jeho zničení.

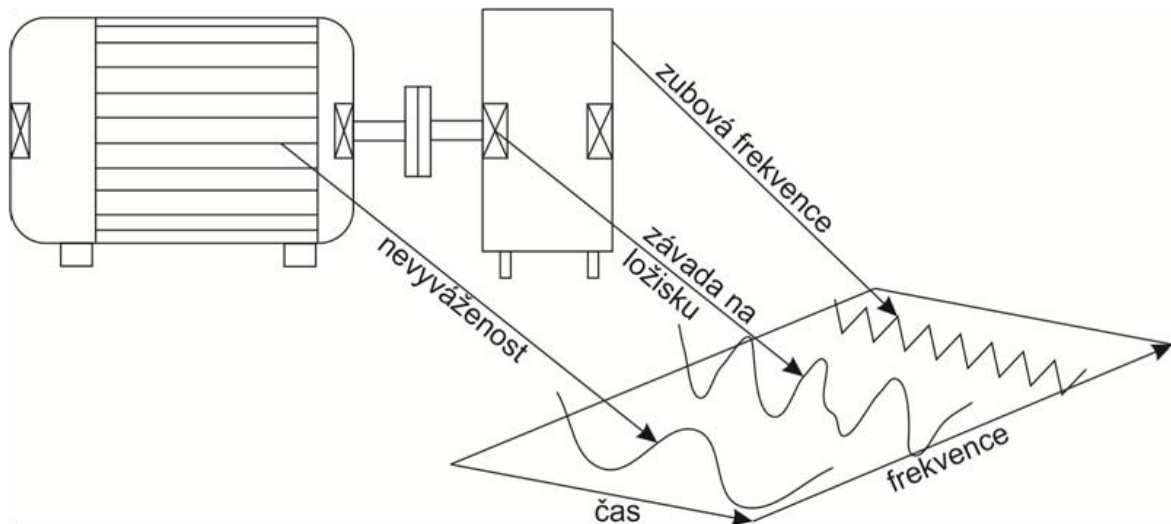
Nucené vibrování nastává době, kdy jsou na sledovaný objekt aplikovány měnící se síly. Příkladem může být pračka, kde celá konstrukce vibruje v rytmu otáčejícího se bubnu. Z hlediska konstrukce je velmi důležité, aby tyto frekvence nebyly shodné s rezonančními frekvencemi.[1]

1.2 Proč měřit vibrace

Vibrace mohou působit nepříznivě na stav strojů, nebo lidské zdraví. Na základně vibrací můžeme zjistit, v jakém stavu se nachází stroje, popřípadě jejich díly a následně včasnou opravou zabránit jejich poruše. Tomuto způsobu kontroly strojů se říká vibrodiagnostika. Vibrace jsou velmi účinným ukazatelem zdrojů namáhání stroje, týkající se zejména ložisek, hřídelí, převodovek, ozubených soukolí, nevyvážených rotačních součástí atd.[2]

1.3 Způsoby a metodika měření vibrací

Měření je nutno provádět systematicky, a to s cílem zjistit jaké spektrum vibrací je na stroji v dobrém technickém stavu. Následně opakovat tato měření v průběhu jeho životnosti. Se zhoršujícím se stavem se mění spektrální složky vibrací. Na základě takovýchto měření lze velmi účinně diagnostikovat, popřípadě predikovat vznikající poruchu a opotřebení.[2]



Obrázek 1: Vibrace různě opotřeбенých částí motoru

1.4 Druhy akcelerometrů

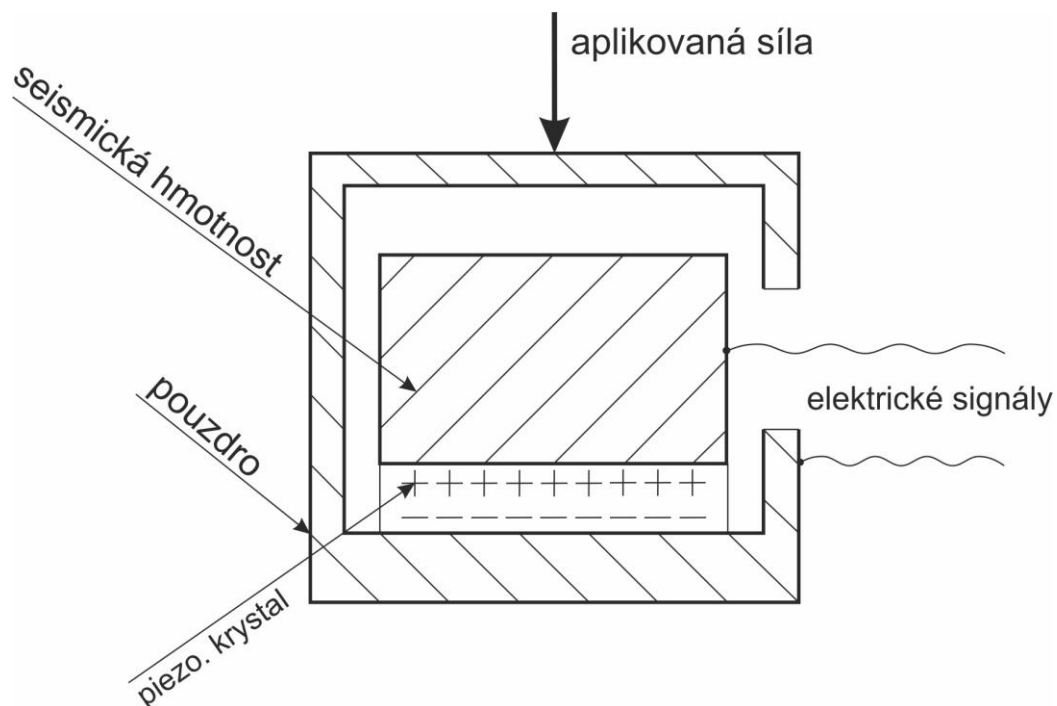
Akcelerometry jsou senzory pro měření statického, nebo dynamického zrychlení. Vhodné jsou také pro měření odstředivých sil, setrvačných sil, ale také pro určování pozice tělesa, nebo jeho naklonění.

1.4.1 Piezoelektrické akcelerometry

Takovýto druh akcelerometru využívá piezoelektrický krystal, který přeměňuje energii působící na jeho stěny na energii elektrickou. Měření náboje piezokrystalu probíhá buď pomocí elektroniky s vysokou vstupní impedancí, nebo je přímo do pouzdra akcelerometru vestavěn zesilovač konvertující tento náboj na napěťový výstup s nízkou impedancí.

Piezoelektrický akcelerometr se skládá ze dvou základních částí. Tou první je Piezoelektrický materiál. Druhá je seizmická hmota, která převádí podle Newtonova zákona hodnotu zrychlení na sílu[3]

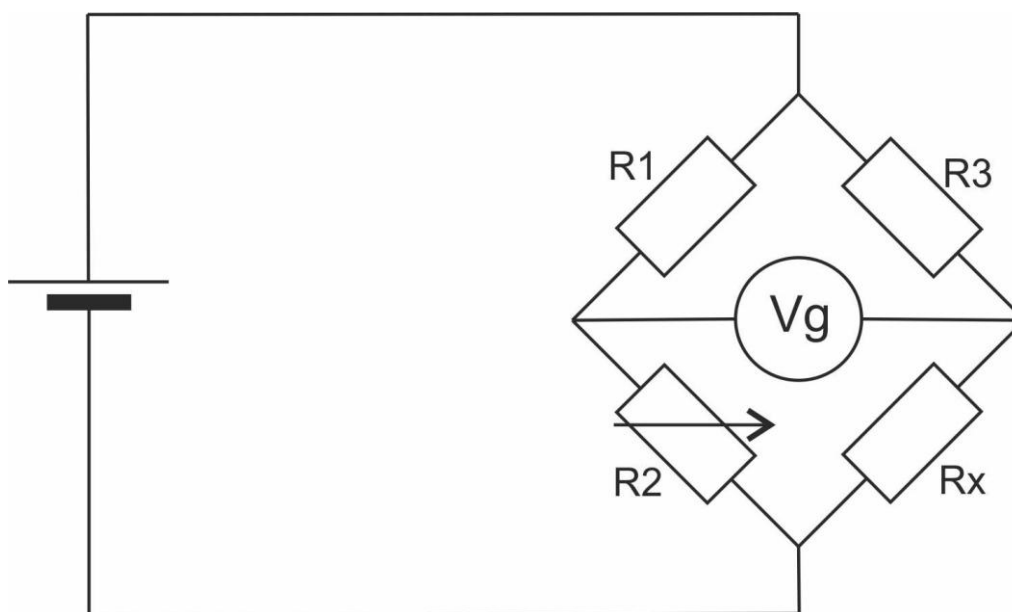
$$F = m * a. \quad (1.2)$$



Obrázek 2: Piezo. akcelerometr

1.4.2 Piezorezistivní akcelerometry

Tento druh akcelerometru využívá piezorezistivní materiál a s jeho pomocí převádí sílu vzniklou urychlováním seismické hmoty na změnu odporu. V integrovaných piezorezistivních akcelerometrech se využívá sítě piezorezistivních snímačů zapojených do Wheatstonova můstku.

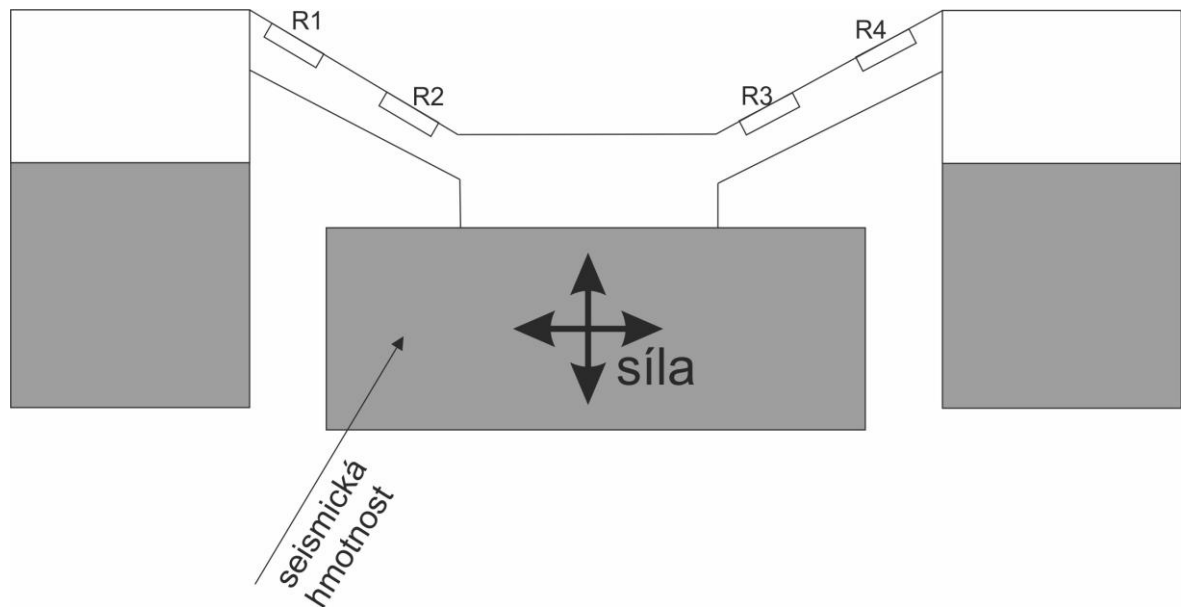


Obrázek 3: Wheatstoneův můstek

Kde výpočet neznámého odporu R_x se provede:

$$R_x = \frac{R_3 * R_2}{R_1}. \quad (1.3)$$

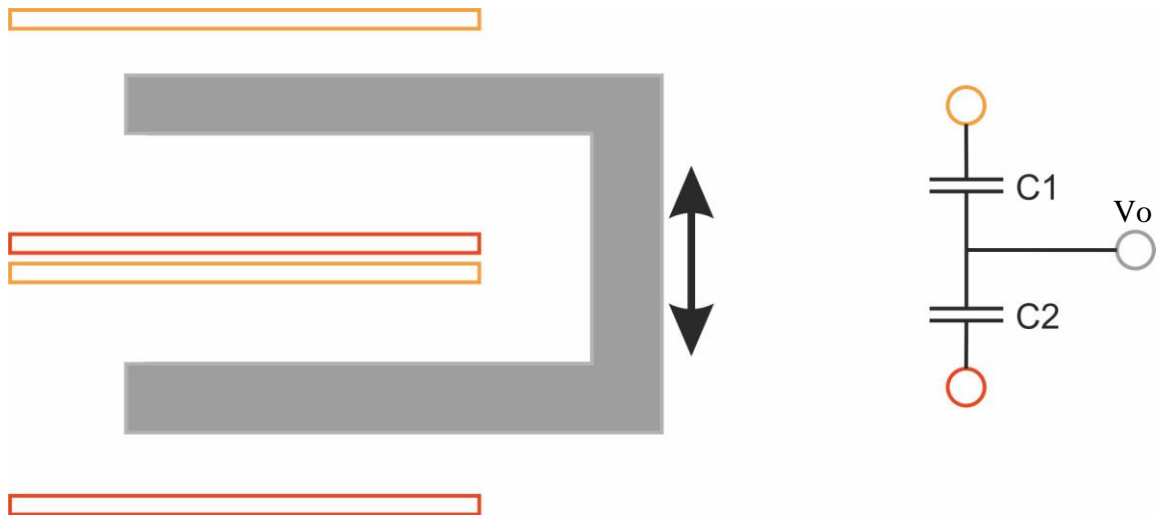
Piezorezistivní akcelerometry mají tu výhodu, že mohou měnit i stálou hodnotu akcelerace tj. frekvenci vibrací o hodnotě 0 Hz.[4]



Obrázek 4: Piezorezistivní akcelerometr

1.4.3 Kapacitní akcelerometry

Dalším velmi rozšířeným typem akcelerometrů jsou akcelerometry kapacitní. Fungují na principu změny kapacity desek vlivem vibrací. Se změnou kapacity se mění také velikost procházejícího střídavého proudu. Výhodou této měřicí metody je velmi vysoká přesnost.[5] Nejběžnějším vnitřním zapojením je diferenciální kondenzátorový pár. Princip je takový, že mezi čtyřmi deskami je pohyblivé dielektrikum vyvolávající změnu kapacity.



Obrázek 5: Diferenciální zapojení kondenzátorů

Výstupní napětí se již snadno spočítá z následujícího vztahu

$$V_o = \frac{c_1 - c_2}{c_1 + c_2} * V_s. \quad (1.4)$$

1.5 Diagnostika vibrací

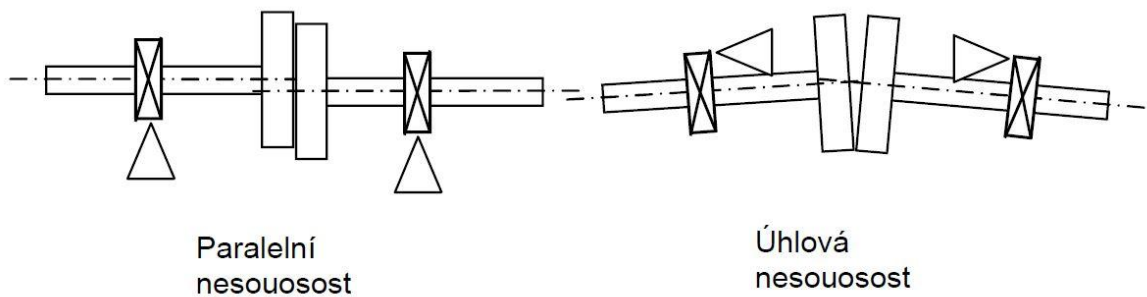
Diagnostika vibrací se dá jinými slovy popsat jako poslech vnitřních částí strojů. Každá komponenta uvnitř takového stroje vibruje trochu jinak a tím zanechává stopu na celkovém obrazu neboli spektru vibrací. Pokud nastane nějaká porucha, změní se i celkové spektrum vibrací. Toto nám umožňuje rozpoznat, zda je nějaká část, kupříkladu mimo osu, je špatně uchycena, nevyvážena, nebo jsou poškozena ložiska. Na základě takovýchto měření, se dá rozhodnout, jestli je nutná okamžitá oprava.

V další části se zaměřím na stručný popis nejčastěji se vyskytujících poruch pohyblivých částí motorů, převodových skříní, ozubených soukolí a ložisek.

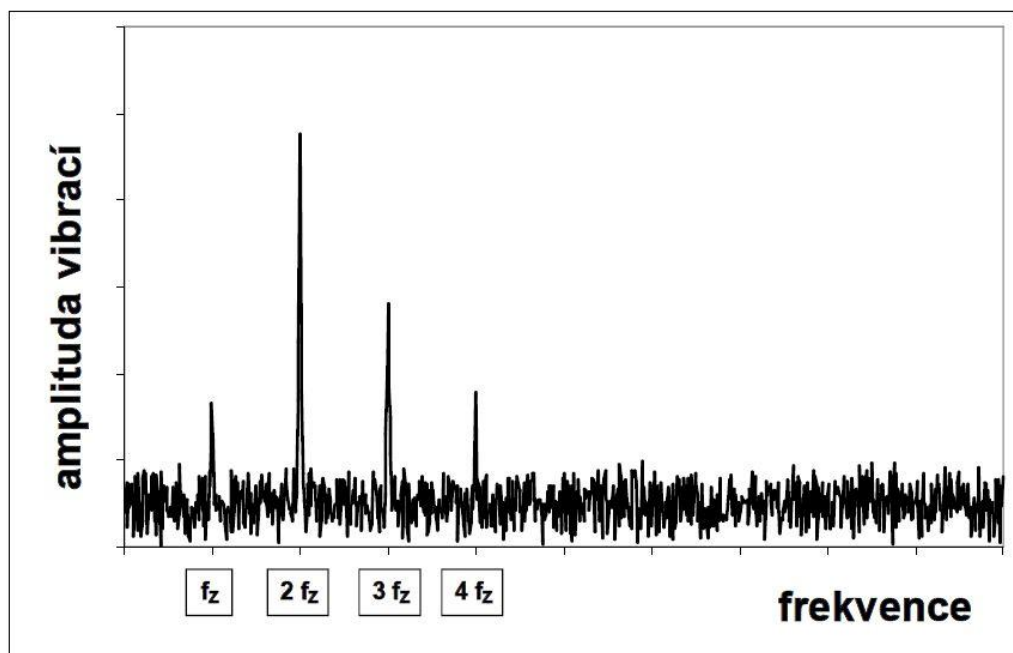
1.5.1 Nesouosost rotorů

Nesouosost rotorů je stav, kdy dva axiálně spojené rotory netvoří totožnou osu rotace. Rozeznáváme dva základní druhy nesouosostí:

- **Úhlová nesouosost** je stav, kdy se osy rotací dvou rotorů různoběžně protínají. Toto přináší do systému ohybové napětí a deformační křivka připomíná tvar písmene U.
- **Paralelní nesouosost** je stav, kdy osy rotací jsou k sobě paralelní, ale neleží ve stejné přímce. Toto přináší do systému ohybové napětí vyvolávající specifický druh vibrací viz následující obrázky.[6]



Obrázek 6: Druhy nesouosostí [6]

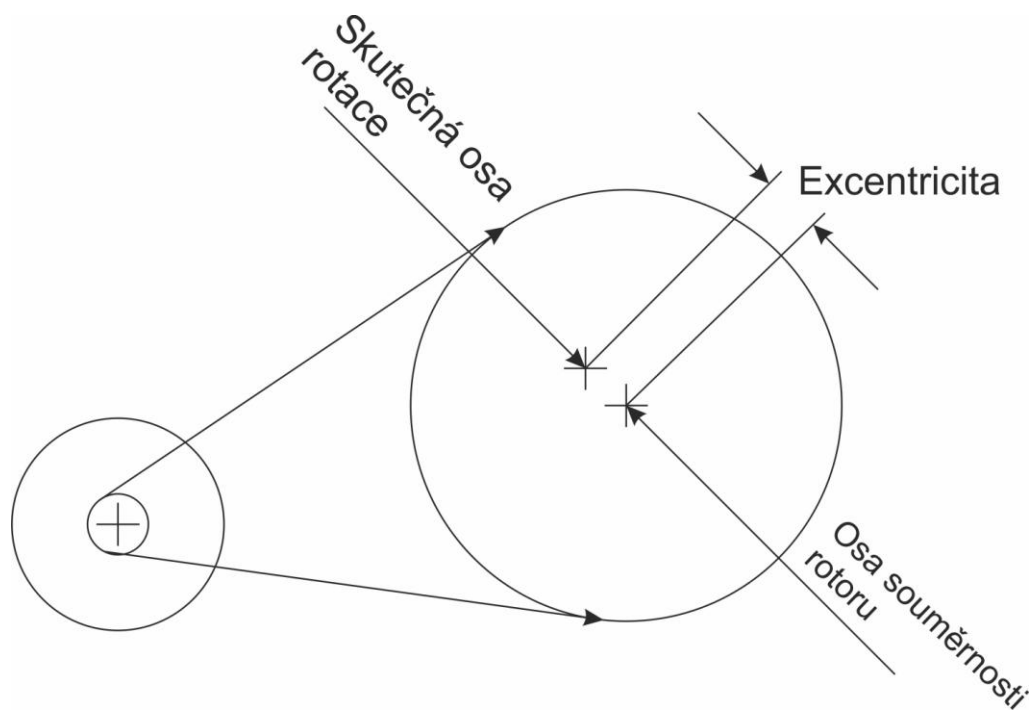


Obrázek 7: Spektrum nesouososti [6]

Ve spektrální analýze je velmi dobře viditelná základní rotorová frekvence f_z . Ovšem osové nesouososti se dají rozpoznat z dominantních vyšších harmonických složek $2*f_z$, $3*f_z$ a $4*f_z$.

1.5.2 Excentrický rotor

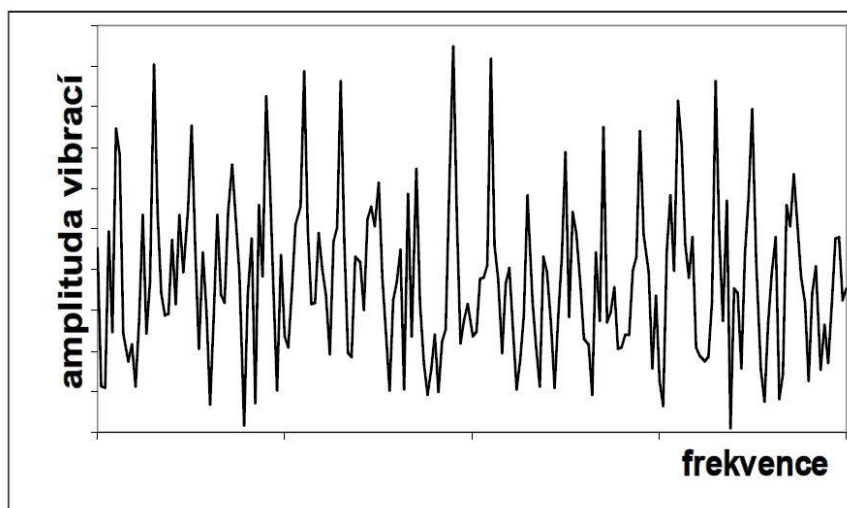
Excentrický rotor je velmi výrazným zdrojem vibrací v případě, že je součástí převodníku (řemenice, ozubené kolo, řetězové kolo atd.). Excentricita je rozdíl osy rotace od osy souměrnosti. Takováto nesouosost vnáší do systému periodickou výchylku způsobující silné vibrace. [6]



Obrázek 8: Excentrický motor

1.5.3 Mechanické uvolnění

Nezbytnou součástí stroje jsou také úložné body, které v případě správné funkce nepřinášejí do vibrací celého stroje žádné další frekvence. V ideálním případě se přes tyto body přenáší nezměněný tvar vibrací dál po konstrukci. Vlivem opotřebení, chybné montáže, nekvalitní konstrukce však může dojít k vytvoření vůle v těchto spojích. Výsledný pohyb je potom značně nesinusový, což se projeví ve spektru. [6]



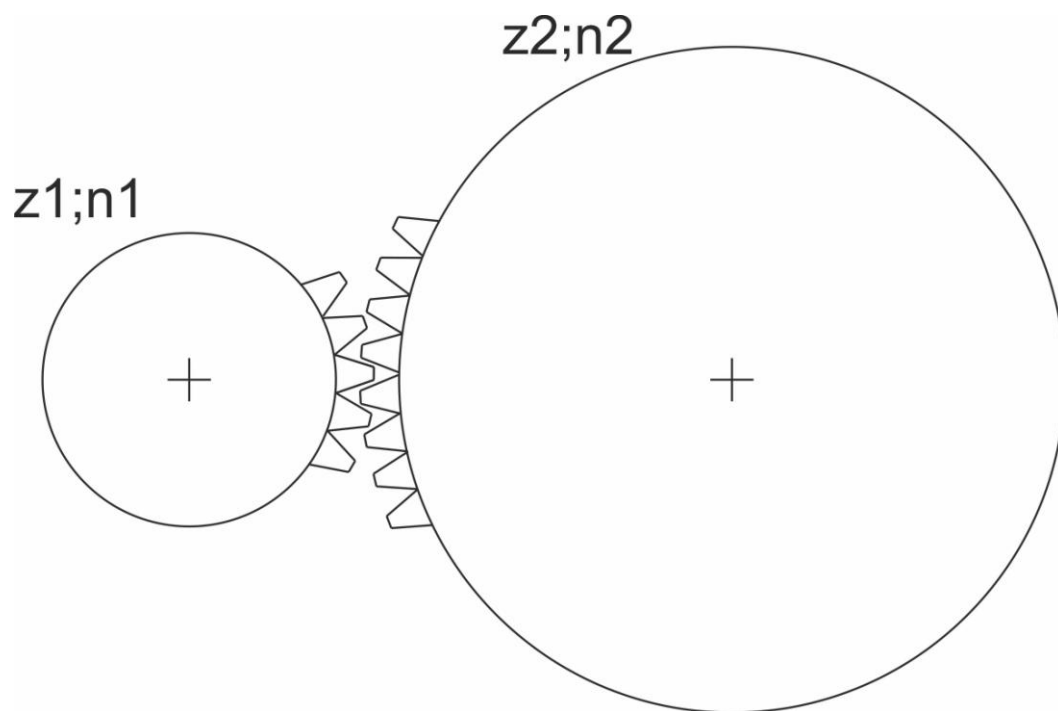
Obrázek 9: Frekvenční spektrum pohybu při mechanickém uvolnění [6]

Tento druh závady je obzvláště důležité odstranit jako první, z důvodu jeho širokého spektra, které může maskovat i jiné druhy závad.

1.5.4 Ozubená soukolí

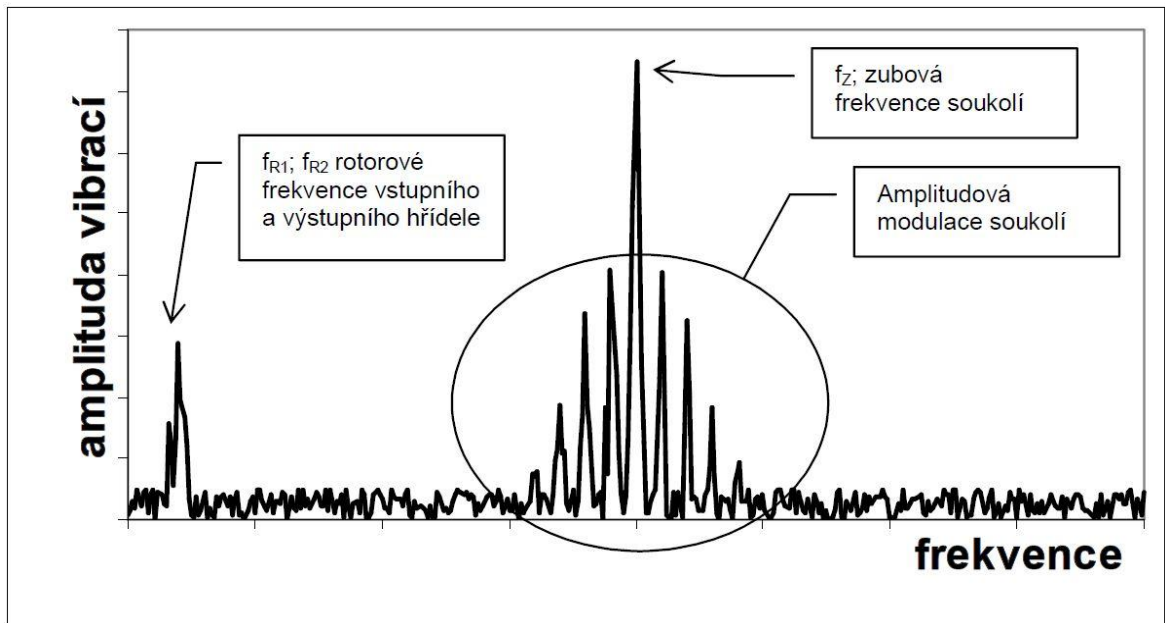
Klasickou součástí strojů, především převodovek jsou ozubená soukolí. Vibrační projev těchto částí je výrazně spojen s kvalitou konstrukce a kvalitou výroby. Hlavní příčiny vibrací v těchto soukolích jsou:

- Jednotlivé zuby vstupují a vystupují do a ze záběru s konstantní periodou.
- Zuby a mezery mezi nimi mohou být vyrobeny s jinou odchylkou.
- Kružnice, které opisují zuby, nemusí být ideálně soustředné.
- Během přenosu krouticího momentu se může měnit tuhost soukolí, tyto změny vnáší periodicky se opakující vibrace v závislosti na záběru kol. Tomuto jevu se říká parametrické buzení.[6]



Obrázek 10: Ozubené soukolí

Parametrické buzení se vyznačuje změnou tuhosti v závislosti na záběru ozubení, které je dané velikostí součinitele trvání záběru ε . Je-li tento parametr roven celočíselné hodnotě, nedochází ke změně tuhosti. Jakákoliv jiná hodnota ε značí, že se v záběru střídají různé počty zubů, což vede ke měnící se tuhosti záběru, danou ohybovou tuhostí zubů. Frekvenční spektrum takového jevu je velmi podobné amplitudové modulaci. Na nízkých frekvencích převládají složky rotorové frekvence hřídelí. Ve středních frekvencích dominuje zubová frekvence f_{zp} , kde častým jevem jsou postranní pásma okolo této frekvence. Tento jev je dán amplitudovou modulací soukolí, ta je obvykle způsobena nesouosostí os rotací, nebo ohnutou hřídelí.[6]



Obrázek 11: Frekvenční spektrum ozubeného soukolí

Základní zubovou frekvenci lze vypočítat pomocí následujícího vztahu:

$$f_{zp} = f_{r1} * z_1 = f_{r2} * z_2, \quad (1.5)$$

kde:

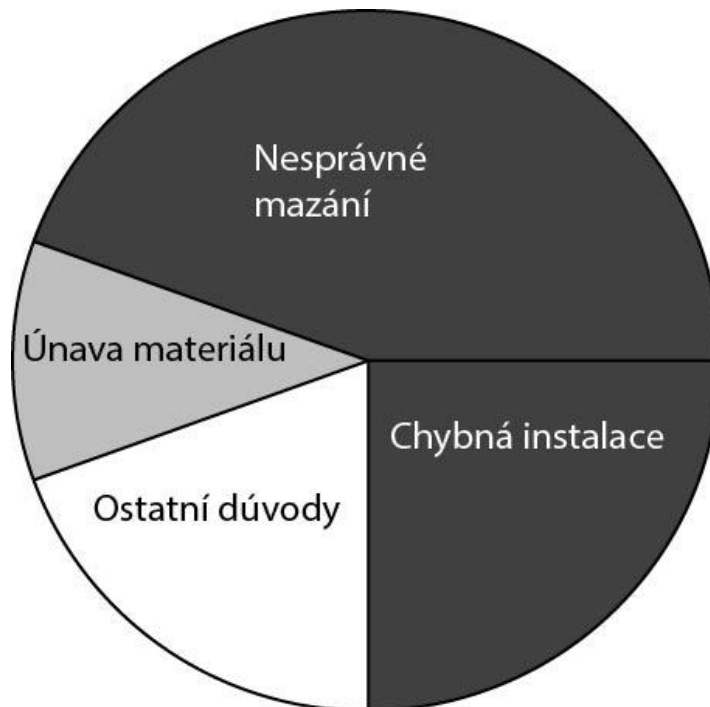
- z_1 značí počet zubů hnacího kola,
- z_2 značí počet zubů hnaného kola,
- f_{R1} značí rotorovou frekvenci hnacího kola [Hz],
- f_{R2} značí rotorovou frekvenci hnaného kola [Hz],
- f_{zp} značí základní zubovou frekvenci [Hz].

Z obrázku je poměrně dobře vidět, že i jednoduché soukolí dokáže vyvolat poměrně složité frekvenční spektrum. Pokud se bude jednat o reálný systém, kde se bude nacházet více soukolí, ložiska rotory atd. můžeme při optimalizaci narazit na problém identifikace jednotlivých příznaků. V tomto případě se využívá pokročilejší forma diagnostiky tzv. cepstrální analýza. U složitějších převodovek je nutné počítat s tím, že i nezatížená soukolí se stále otáčí a tím vnáší do celého systému své vibrace.[6]

1.5.5 Kluzná a valivá ložiska

Ložiska slouží k minimalizaci tření mezi točnými částmi stroje a jejich uložením. Tento otáčivý pohyb je při provozu zatížen třením, právě toto tření vnáší do systému nežádoucí vibrace.

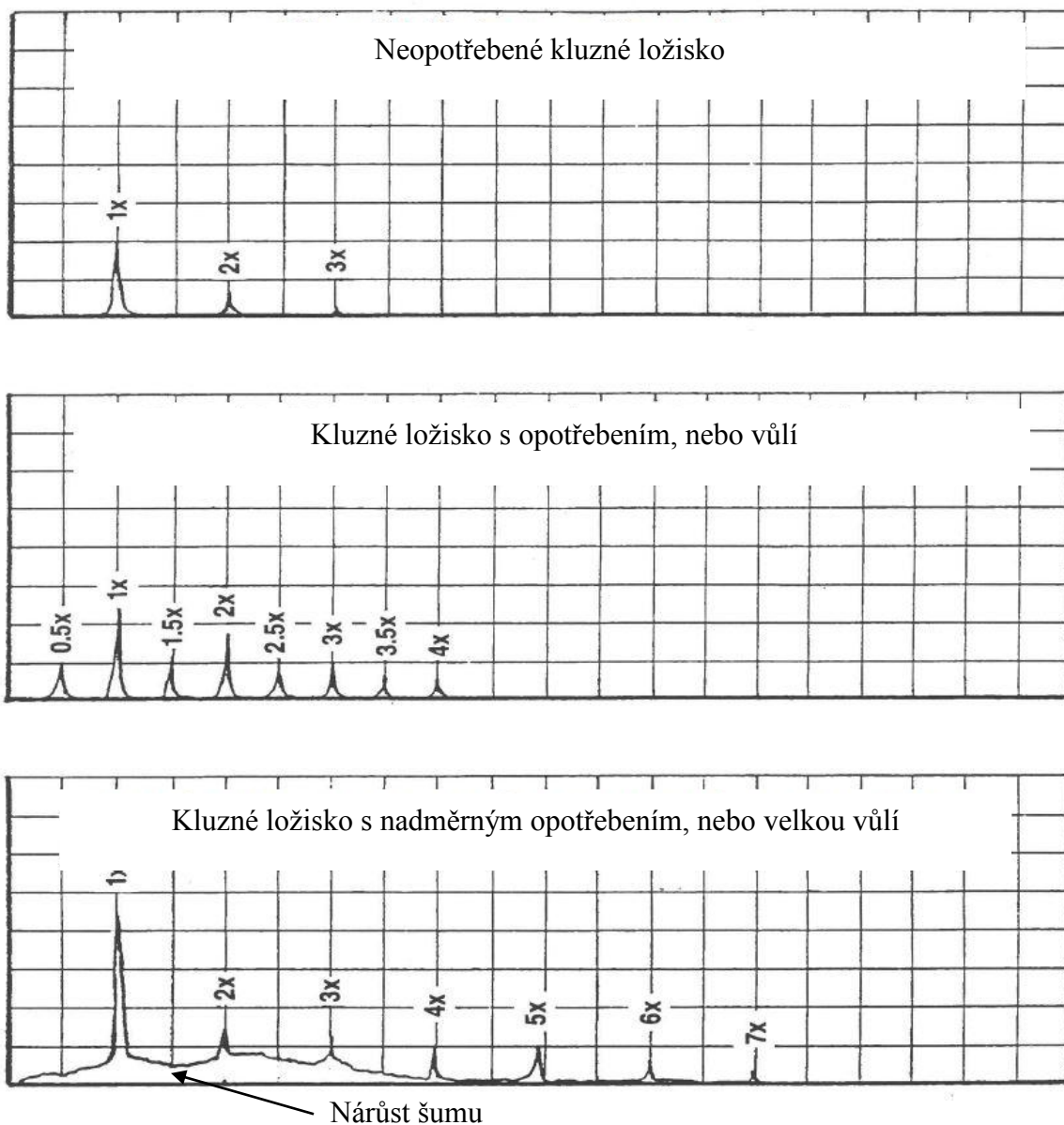
Na úvod do této kapitoly bych rád pro zajímavost uvedl důvody poruch ložisek, které jsou v následujícím grafu. [6]



Obrázek 12: Důvody poruch ložisek

Z grafu je patrné, že téměř tři čtvrtiny poruch jsou způsobeny nedbalostí ať chybnou instalací, tak nesprávným mazáním.

Opatřebení a problémy s vůlí se obvykle projevují přítomností celé řady vyšších harmonických. Počínaje základní otáčkové frekvencí, až do desetinásobku této frekvence. Obvykle však největší nárůst nastává na první harmonické frekvenci. Tento jev je způsoben nárůstem poddajnosti celé soustavy. Typickou závadou kluzných ložisek je uvolnění mezi ložiskovým stojanem a ložiskem. Při velmi velkém poškození ložiska spektrum vibrací dokáže napovědět zvýšením šumu kolem sledovaných harmonických frekvencí.[6]



Obrázek 13: Typická spektra vibrací, pro různé opotřebení ložisek [6]

Na závěr této kapitoly musím podotknout, že měření v reálném prostředí se bude provádět v radarové anténě jakožto celku. Tato skutečnost přináší riziko falešných vibrací způsobených větrem opírajícím se do antény, blízkým leteckým provozem a jinými zdroji otřesů. S tímto faktem je zapotřebí v dalším rozvoji této práce je počítat a pokusit se navrhnout takové metody snímání a následného signálového zpracování, které budou eliminovat tyto nežádoucí projevy.

2 Technické zpracování

Tato kapitola je věnována zpracování všech technických problémů. Především se zde zaměřím na datovou komunikaci mezi A/D převodníkem a procesorem Xilinx Zynq, na komunikaci mezi touto deskou a řídicím počítačem pomocí optického sériového portu, nebo Ethernetovým rozhraním LAN. Dále se zaměřím na zpracování těchto signálů v digitální části systému, a to především ve frekvenční oblasti včetně jejich vyhodnocení. Zvláštní pozornost věnuji konstrukci nízkošumových symetrizačních zesilovačů potřebných pro zesílení signálu z čidel. V neposlední řadě také na návrhu napájecích zdrojů potřebných pro veškerou elektroniku.

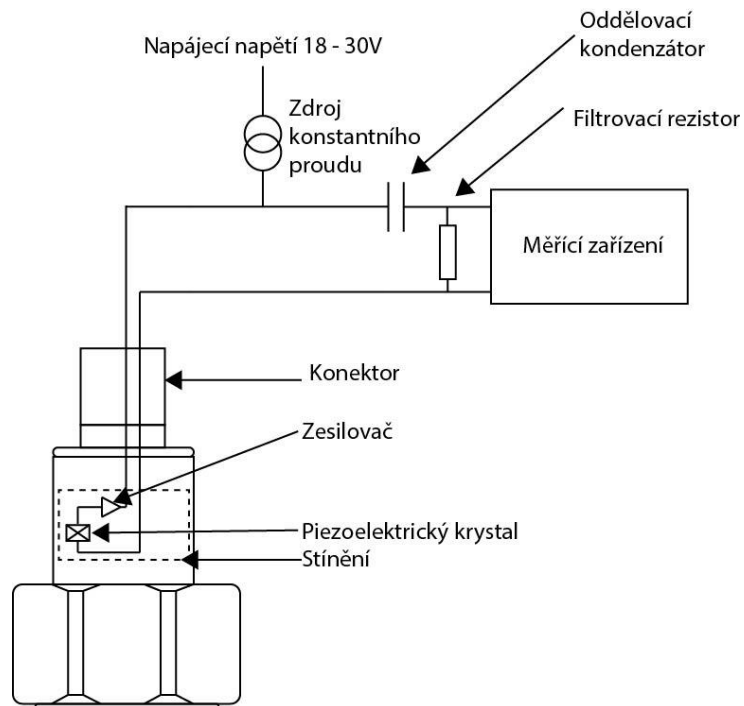
2.1 Výběr vibračního čidla

Na základě interního rozhodnutí firmy Eldis Pardubice, s.r.o. mi bylo doporučeno vycházet ze skladových zásob. Na základě toho rozhodnutí jsem zvolil čidlo 780B od společnosti Wilcoxon. Jedná se o piezoelektrické čidlo patřící do rodiny lehkých čidel vhodných jak pro pevnou montáž, tak pro přenosné ruční měření. Nejdůležitější parametry tohoto senzoru jsou popsány v následující tabulce.

Tabulka 1: Akcelerometr 780B

Citlivost [mV/g]	100
Tolerance (+/-)	10%
Frekvenční charakteristika [Hz]	0,4 - 1400
Elektrický šum [$\frac{\mu g}{\sqrt{Hz}}$]	4

Většina piezoelektrických akcelerometrů potřebuje jako napájení konstantní zdroj proudu. Následné měření se poté provádí na derivačním článku. Tento článek je složen z oddělovacího kondenzátoru, který slouží pro oddělení stejnosměrné složky a rezistoru na kterém vznikne úbytek napětí. Právě toto napětí je zesíleno a vzorkováno. Schematické zapojení je uvedeno na následujícím obrázku.



Obrázek 14: Zapojení PIEZO senzoru [7]

Dle datasheetu je doporučená kapacita kondenzátoru 30 – 100 uF. Jako jediný neznámý údaj je velikost filtrovacího rezistoru. Tuto hodnotu je nutné spočítat ze vztahu pro derivační člunek, jinými slovy horní propust

$$f = \frac{1}{2 * \pi * R * C}. \quad (1.6)$$

Po vyjádření R rovnice přechází v následující tvar

$$R = \frac{1}{2 * \pi * f * C}, \quad (1.7)$$

kde f je mezní frekvence, v našem případě 0,4 Hz. Velikost vazebního kondenzátoru je 100uF. Výsledná velikost filtračního rezistoru je dána,

$$3978 = \frac{1}{2 * \pi * 0,4 * 100 * 10^{-6}}. \quad (1.8)$$

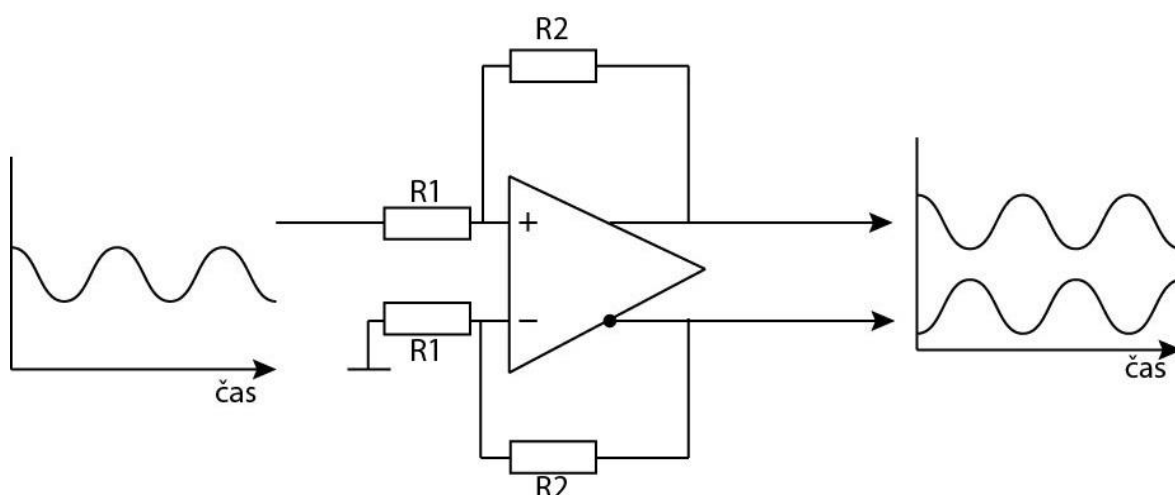
Z předchozího vztahu plyne, že velikost rezistoru je cca 4kΩ. Ovšem jako další faktor, který je třeba vzít do úvahy je vstupní impedance zesilovače.

$$R_{in} = \frac{R_g}{1 - \frac{R_f}{2 * (R_g + R_f)}}. \quad (1.9)$$

R_g a R_f jsou rezistory určující zesílení a zároveň vstupní impedanci zesilovače. V mém případě jsem zvolil $R_g = 2000\Omega$ a $R_f = 10000\Omega$. Po dosazení těchto hodnot do rovnice (1.9) vstupní impedance vyjde $R_{in} = 3428\Omega$. Po uvážení těchto dvou hodnot jsem zvolil výslednou hodnotu na 3600Ω .

2.2 Návrh diferenčních zesilovačů

Tento typ zesilovačů konvertuje vstupní signál na diferencovaný výstupní signál. Hlavní výhodou je nezávislost výstupního signálu na globální zemi. Další výhodou je vysoká odolnost proti všudypřítomnému rušení v radarové anténě.



Obrázek 15: Diferencující zesilovač

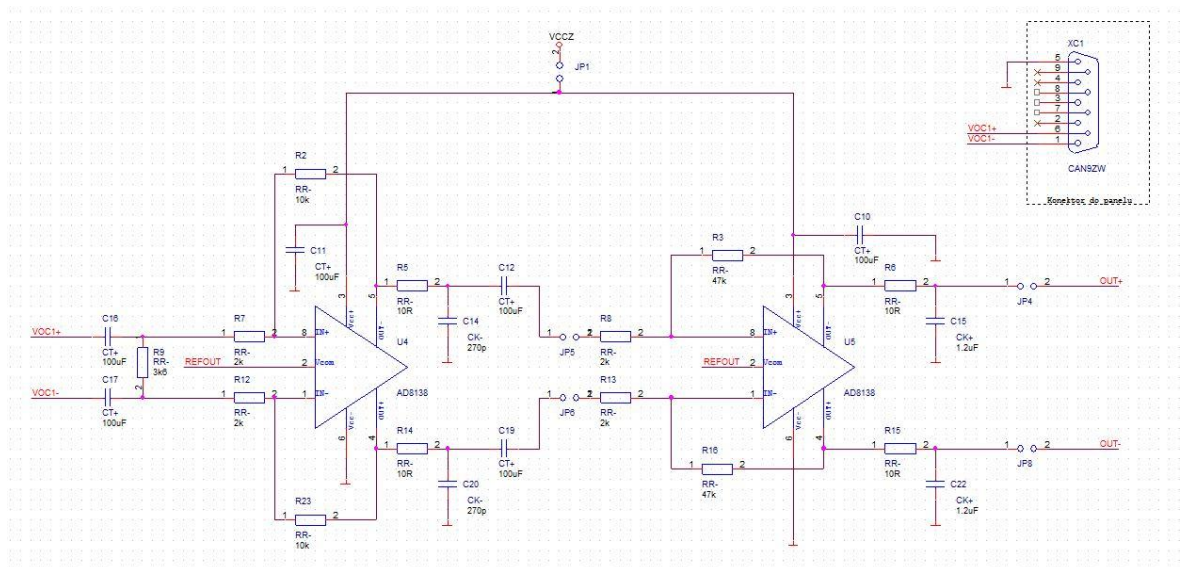
Je předpokládáno, že obě výstupní cesty jsou vedeny velmi blízko sebe. Právě v tomto případě, pokud se nějaké napětí naindukují do těchto cest, na straně příjmu signálu bude stejné. V našem případě se jedná o A/D převodník s diferencovaným vstupem, který potlačí toto rušivé napětí. Důvodem je sledování pouze rozdílů napětí, které nám zesilovač poskytuje. Jinými slovy zajímá nás pouze rozdíl signálů, a ne jejich stejnosměrná úroveň.

Z experimentálního měření vibračního senzoru bylo zjištěno, že v reálném provozu se maximální hodnota výstupního napětí pohybuje v rozmezí mezi 30 – 40 mV. Toto napětí je nutno zesílit na maximální rozlišovací úroveň 5V A/D převodníku. Pro výpočet teoretického maximálního zesílení jsem použil následující vztah:

$$A_{max} = \frac{U_{in A/D}}{U_{out \text{ čidlo}}} = \frac{5}{0,04}. \quad (1.10)$$

Maximální zesílení, které ještě nebude saturovat vstupní obvody A/D převodníku je 125. Další krok je navržení zesilovačů s příslušným zesílením. Jako zesilovací stupně byly vybrány zesilovače typu AD8138 od společnosti Analog Devices. Hlavním důvodem jejich výběru jsou nízkošumové vlastnosti a možnost přivedení na vstup jak diferencované napětí, tak napětí vztažené proti zemi. Zesílení tohoto typu zesilovače se dá vypočíst z následujícího vztahu:

$$A = \frac{R_2}{R_1}. \quad (1.11)$$



Obrázek 16: Schematické zapojení zesilovačů

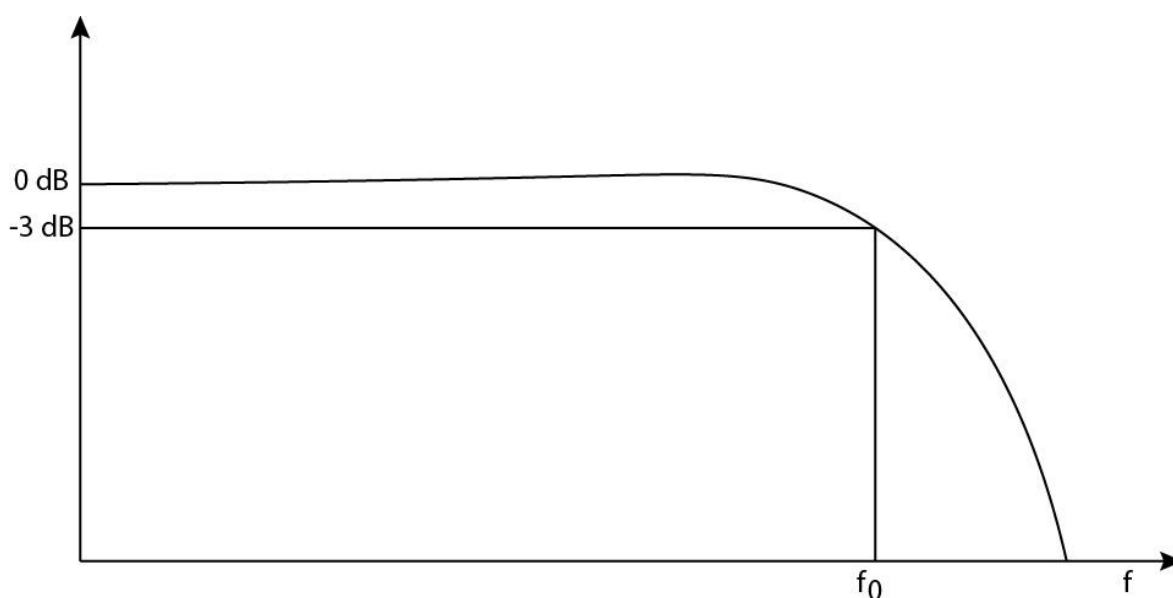
Zesilovač je složen ze dvou zesilovacích stupňů, kde první stupeň má zesílení $A_1 = R_2/R_1 \Rightarrow A_1 = 10000/2000 = 5$. Tento stupeň slouží pouze pro předzesílení signálu a jeho konverzi na signál symetrizovaný. Druhý zesilovací stupeň je určen k zesílení signálu na potřebnou úroveň pro A/D převodník. Zesílení tohoto stupně je rovno $A_2 = 47000/2000 = 23,5$. Celkové zesílení takového obvodu je po té rovno:

$$A_{celk} = A_1 * A_2 = 5 * 23,5. \quad (1.12)$$

Celkové zesílení je menší než maximální zesílení, a to z důvodu rezervy pro případ neočekávaných nárazových vibrací, které by mohly saturovat vstupní obvody A/D převodníku. Poslední ochranou pro A/D převodník je anti-aliasingový filtr. Tento filtr slouží

k filtrování frekvencí větších jak $\frac{1}{2} * F_s$. Za A/D převodník je použit obvod typu AD7175-2. Tento převodník disponuje vzorkovací frekvencí pro jeden kanál 125kSPS a pro více kanálů 50kSPS. Hodnotu anti-aliasingového filtru je z důvodu bezpečnosti nutno zvolit k nižší hodnotě vzorkovací frekvence, tedy k 50kSPS. Maximální frekvence, kterou je tedy možno vzorkovat je $50000/2=25000$ Hz. Je nutno zahrnout také maximální frekvenci, kterou může poskytnout senzor vibrací, a to je podle datasheetu 14000 Hz. Výsledný anti-aliasingový filtr tedy není nutno navrhovat na frekvenci 25000 Hz, ale stačí na frekvenci 14000 Hz. Výpočet dolní propusti se provede dle následujícího vztahu:

$$f_0 = \frac{1}{2 * \pi * R * C}. \quad (1.13)$$



Obrázek 17: Závislost zisku na frekvenci

Po dosazení řadových hodnot rezistorů a kondenzátorů vyjde f_0 :

$$f_0 = \frac{1}{2 * \pi * 10 * 1,2 * 10^{-6}} = 13263 \text{ [Hz]}. \quad (1.14)$$

Toto nastavení filtru je dostatečně blízko maximální frekvenci vibračního čidla a zároveň dostatečně daleko od Nyquistické frekvence A/D převodníku.

2.3 Návrh A/D převodníku

Jako A/D převodník byl vybrán AD7175-2 od společnosti Analog Devices. Jedná se o sigma-delta převodník, a právě takovýto druh převodníku umožňuje až 24 bitové rozlišení v amplitudě. Jeho dalšími výhodami jsou čtyři jednovstupové kanály, nebo dva diferenční kanály. V reálných podmínkách při použití maximální rychlosti bude podle datasheetových hodnot použitelných 20 bitů nezátížených šumem. I přes tento úbytek je SNR pro danou aplikaci je bohatě dostačující.

$$SNR = 20 * \log(2^N), \quad (1.15)$$

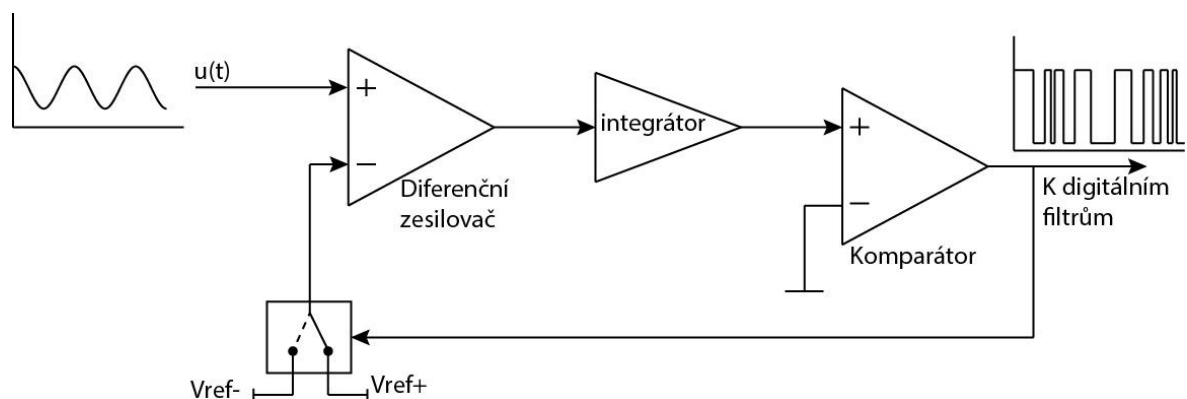
kde N je rovno počtu bitů. Výsledné SNR je tedy,

$$SNR = 20 * \log(2^{20}) = 120,4[dB]. \quad (1.16)$$

Ze vztahu pro SNR plyne, že odstup signál šum bude na hodnotě blízké 120 dB.

2.3.1 Princip sigma-delta převodníků

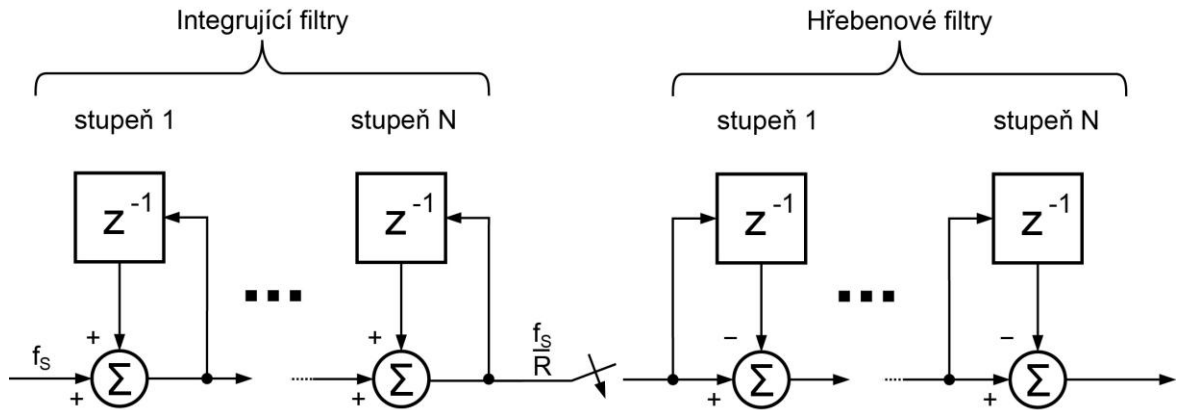
Hlavní skupinu převodníků pro použití v nižších frekvencích, řádově kSPS jsou právě sigma-delta převodníky. Jejich hlavními výhodami proti ostatním převodníkům je vysoká bitová hloubka převodu a to řádově 16 – 32 bitů. Stejně tak jako vysoká přesnost převodu díky integračnímu članku v převodníku. Poslední hlavní výhodou je schopnost přetransformovat šum z nižších frekvencí do oblasti frekvencí blízké F_s .



Obrázek 18: Blokový diagram sigma-delta modulátoru

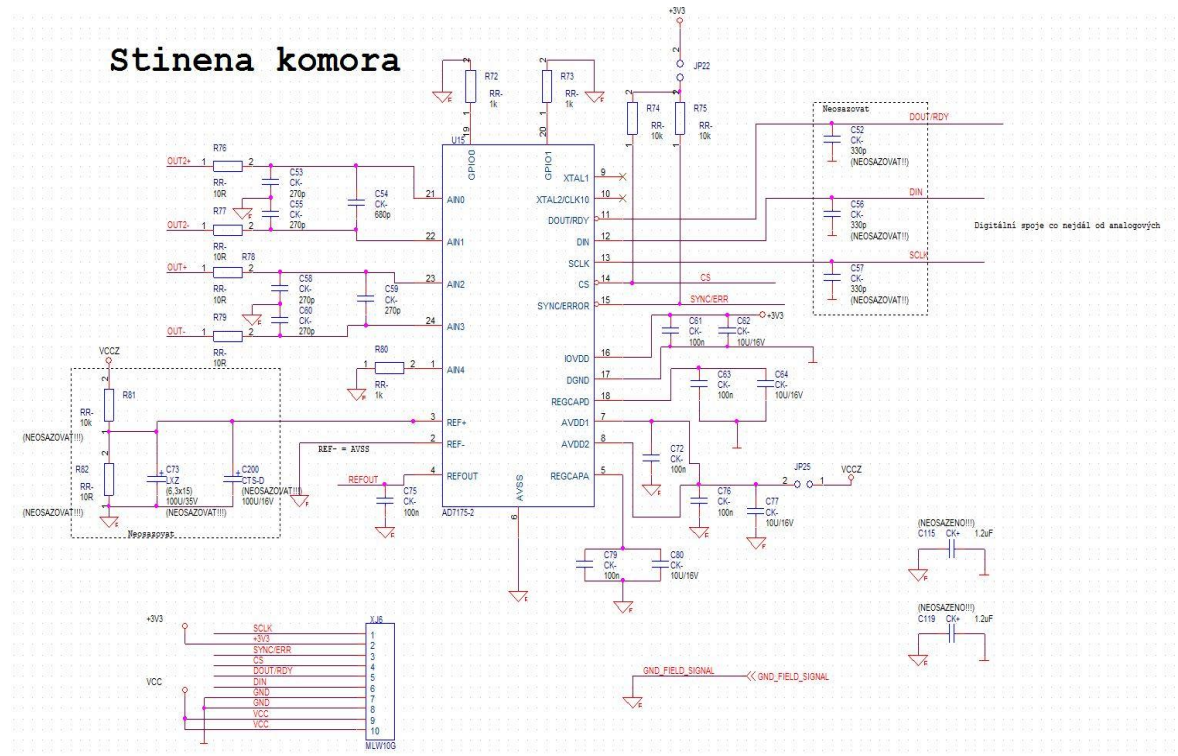
Z obrázku 18 je patrné, jak převodník moduluje vstupní napětí na PDM modulaci. Jedná se o jednobitový proud dat o vysoké frekvenci, řádově MHz. Tento proud dat je nutné decimovat, aby ho bylo možno dále zpracovat. O tuto činnost se starají digitální filtry.

CIC decimační filtr



Obrázek 19: Decimační filtr [8]

Výstupem z takového filtru je datové slovo, které se po sériové sběrnici přenáší do zařízení zpracujícího tento digitalizovaný signál.



Obrázek 20: Zapojení AD7175-2

Srdcem celého projektu je A/D převodník, který slouží k digitalizaci spojitého signálu. Na obrázku 20 jsou vidět vstupy AIN0, ..., AIN3 tyto vstupy jsou diferenční právě pro zvýšení odolnosti proti rušení. Zároveň jsou k těmto vstupům také připojeny kondenzátory, a to jak

proti zemi, tak mezi oběma kanály (invertujícím a neinvertujícím). Takovéto zapojení kondenzátorů slouží k prevenci soufázového a protifázového rušení. AIN4 je nezapojen. O referenční napětí se starají vstupy REF+, REF- a REFOUT. Při programování převodníku se dají nastavit registry do stavu, kdy si převodník generuje své vlastní referenční napětí, nebo lze využít externí reference. Jako externí referenční zdroj napětí je připraven odporový dělič nastavený na napěťový poměr 1:1, kde výstupní napětí bude 2,5V. Výstup REFOUT je interní 2,5V reference přivedená do bloku zesilovačů. Převodník je napájen dvěma napětími. První AVDD1,2 je napětí pro 5V analogovou část převodníku. IOVDD je napájení pro digitální komunikaci s procesorem, kde je důležité zachovat správné napěťové úrovně. Xilinx Zynq používá pro datovou komunikaci 3,3V, tím pádem je nutné napájet převodník také z 3,3 voltového zdroje.

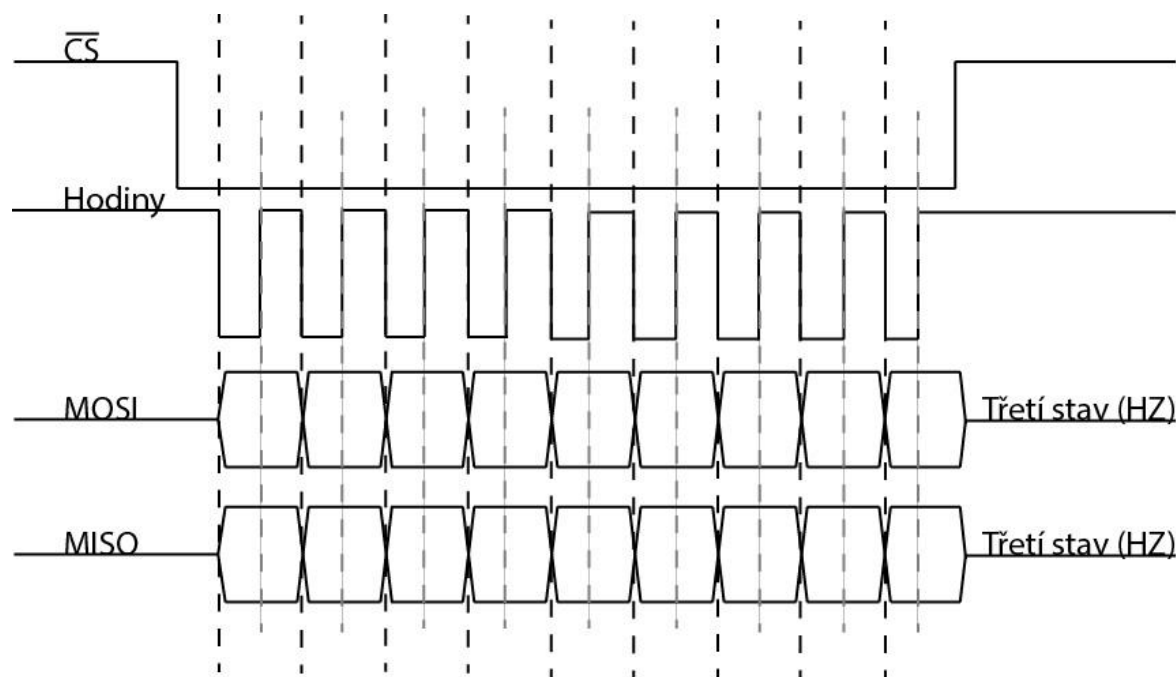
2.3.2 SPI komunikace

Důležitým blokem, kterému se budu věnovat je standardizovaná Serial Peripheral Interface dále jen SPI. Tato komunikace se využívá mezi zařízeními Master a Slave.

Master – řídí komunikaci a volí zařízení, se kterým bude komunikovat a generuje pro tuto komunikaci hodinový signál.

Slave – je zařízení, které je řízeno Mastem.

Pro spolehlivou komunikaci je velmi důležité udržet správné časování na sběrnici.

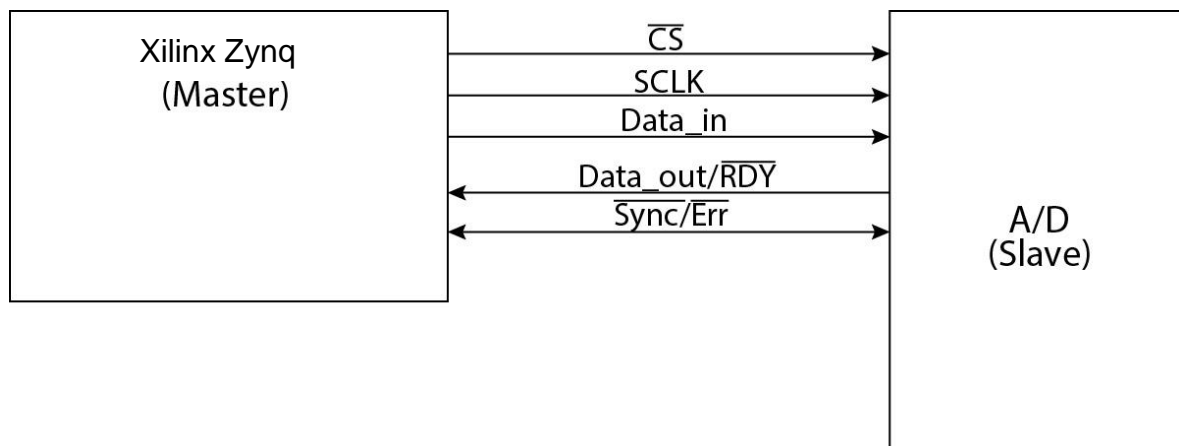


Obrázek 21: Časové diagramy na SPI

Aby bylo možno zahájit komunikaci je nejprve nutné s dostatečným předstihem přepnout na log. 0 Čip Select dále jen CS. Tento povel dává informaci pro Slave v, našem případě A/D převodník, že s ním zahajujeme komunikaci. Hodinový signál je držen v log. 1 do doby zahájení komunikace. Při přenosu dat je přesně definovaný počet hodinových taktů, který přenáší data. Na každou sestupnou hranu hodinového signálu (nebo uprostřed intervalu log. 0) se mohou měnit data v obou směrech. Na každou náběžnou hranu hodinového signálu jsou platná data, opět v obou směrech.

2.3.3 Programové řešení SPI komunikace

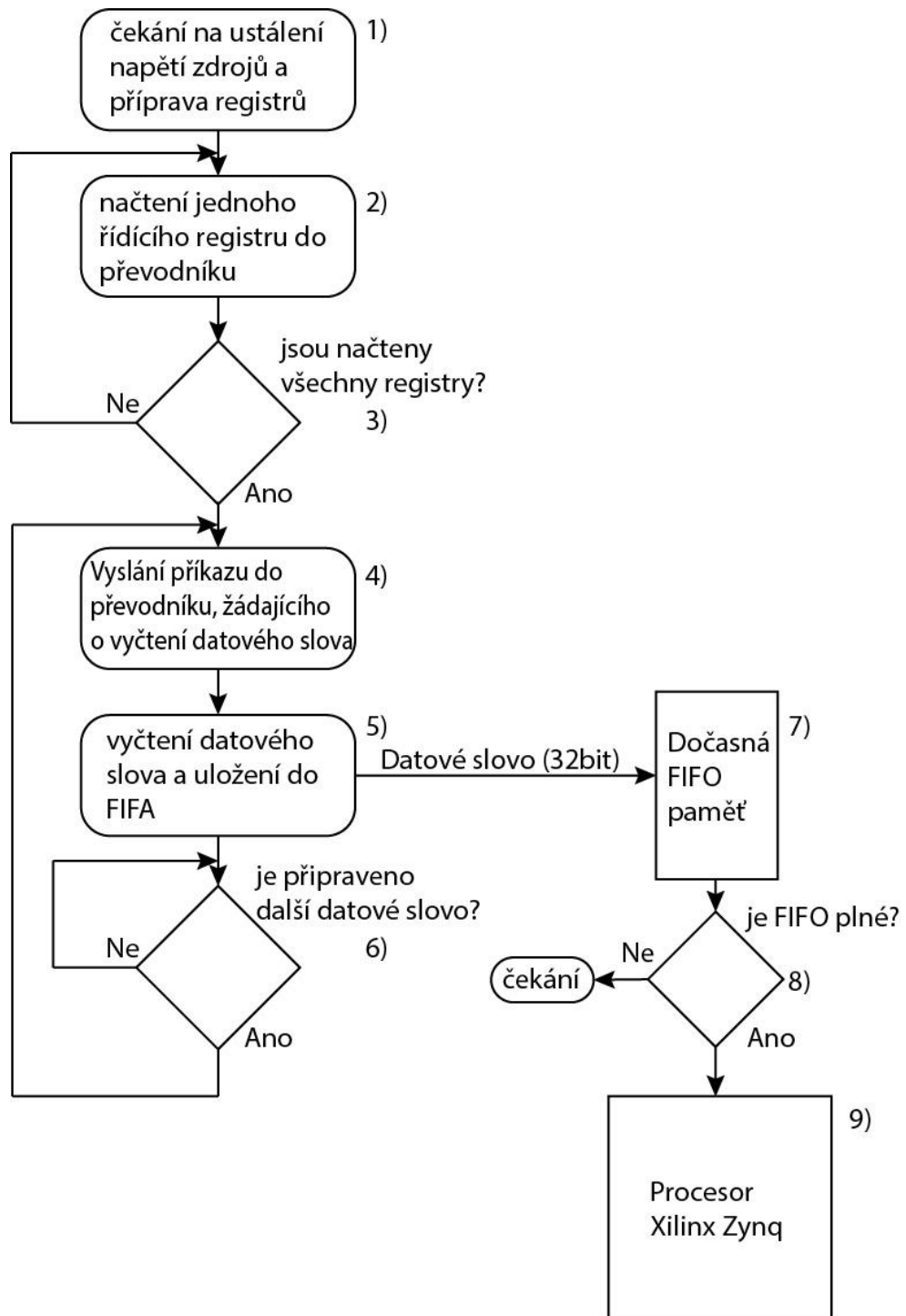
Jak již bylo zmíněno v předešlé kapitole, komunikace je řešena pomocí standardního sériového rozhraní. Komunikace probíhá mezi hradlovým polem Xilinx Zynq(Master) a A/D převodníkem (Slave).



Obrázek 22: Datová komunikace mezi Xilinx Zynq a A/D

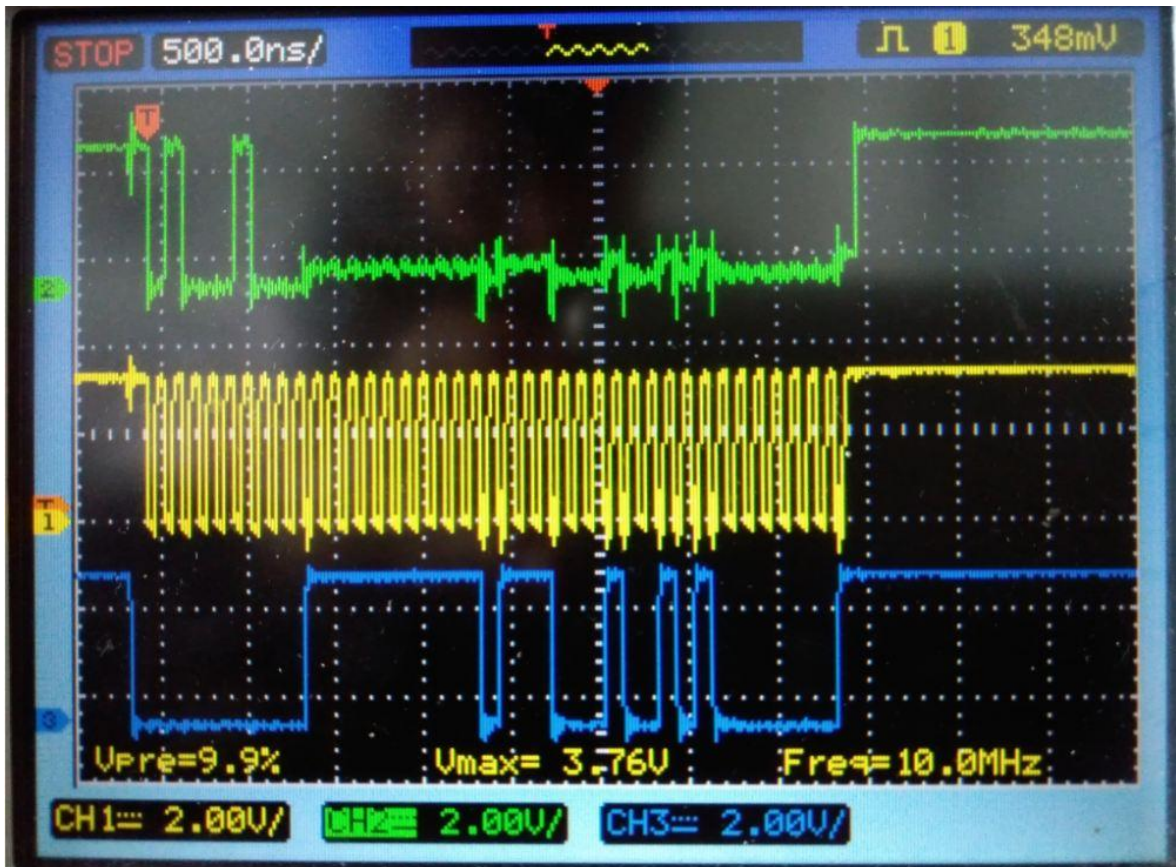
Samotný zdrojový kód je přiložen v příloze A. V této části se zaměřím pouze na popis stavového diagramu komunikace.

- 1) První blok programu slouží k vyčkání na ustálení napájecího napětí. Tento krok je velice důležitý, z důvodu zajištění bezchybnosti přenosu. Zároveň se připraví hodnoty registrů, které se budou nahrávat do převodníku.
- 2) Dalším krokem je samotné načtení registru do převodníku. Komunikace je zahájena vysláním 8 bitové adresy. Tato adresa říká, jaký registr chceme nahrávat. Po adrese je hned navázána 16 bitová sekvence bitů nesoucí informaci o nastavení převodníku.
- 3) Tento proces se opakuje stále dokola, dokud se nenahraje poslední registr.
- 4) Po nahrání všech registrů se převodní přepne do módu nepřetržité konverze. Před každým vyčtením datového slova je nutno zaslat správnou adresu (0x44).
- 5) Po tomto příkazu následuje proud výstupních 32bitových dat složených z horních 24bitů, kde bit1 je MSB a bit 24 LSB. Posledních 8 bitů je krátký registr příznaků, indikující například přetečení, nebo podtečení převodníku. Takto přijaté datové slovo je uloženo do FIFO paměti.
- 6) Po dokončení vyčtení dat se výstup převodníku přepne do log. 1. V tomto stavu zůstane až do doby, kdy bude hotová konverze. Poté se výstup přepne do log. 0, čímž dá na vědomí, že může začít opětovné vyčítání dat.
- 7) Jedná se o malou vyrovnávací mezipaměť ležící mezi procesorem a převodníkem. Tato paměť slouží k tomu, aby procesor nemusel neustále číst každé jednotlivé slovo z převodníku. Na místo toho přečte balík dat najednou a poté vyčkává na opětovné naplnění FIFO.
- 8) Pokud je FIFO plné, zahájí se jeho vyčtení.
- 9) V procesoru se z těchto dat vypočítává FFT a na základě analýzy spektra se mohou vyhlásit varování do řídicího počítače.



Obrázek 23: Stavový diagram datové komunikace

Na obrázku je vidět komunikace přímo s A/D převodníkem.



Obrázek 24: Reálný průběh SPI komunikace zobrazený na osciloskopu

Zelený průběh jsou vstupní data (DIN), ve kterých je poslán příkaz pro vyčtení datového slova z převodníku. Toto datové slovo má binární podobu 01000100.

Žlutý průběh jsou komunikační hodiny (SCLK). Kde prvních 8 bitů jsou takty pro vstupní sekvenci dat. Dalších 24 bitů jsou výstupní data z převodníku a posledních 8 bitů jsou statusové registry.

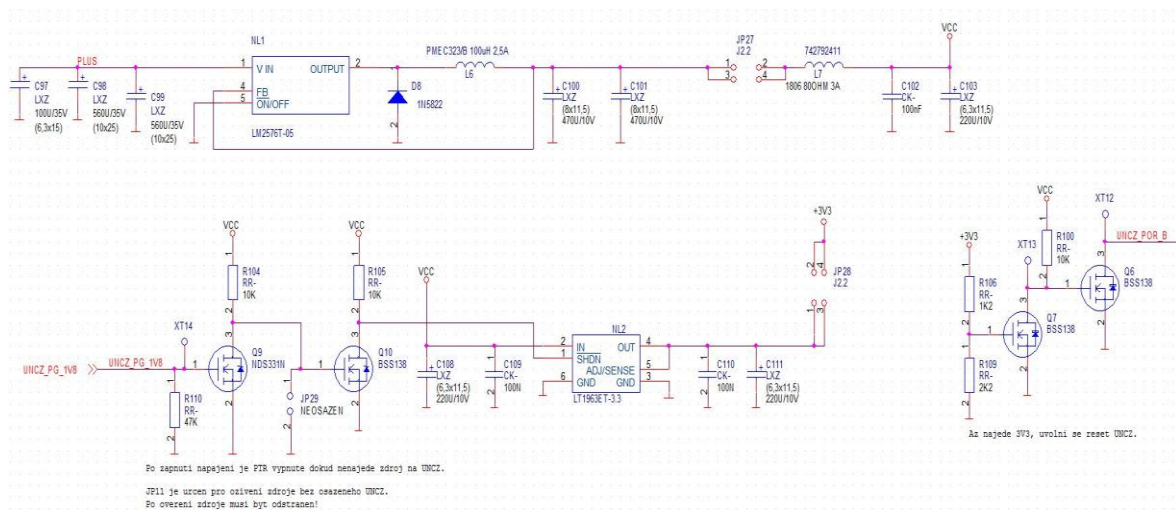
Modrý průběh jsou data z převodníku (DOUT). Kde prvních 8 bitů převodník drží na výstupu log. 0: V této fázi čeká na kompletní příkaz, co má vlastně dělat. Po přijetí tohoto příkazu začíná s každou sestupnou hranou hodin plynule vysouvat 24 bitové datové slovo. Na konci tohoto slova je přidán stavový registr, který v případě nějakých chyb na příslušné pozice těchto posledních osmi bitů vyše log. 1 indikující chybu.

2.4 Návrh napájecích zdrojů

Napájecí zdroje jsou nedílnou součástí všech elektronických zařízení, a právě na kvalitě napájecích zdrojů závisí spolehlivý provoz ostatních elektronických součástí. Na základě interního doporučení jsem zvolil jako hlavní napájení celého výrobku 24V. Důvodem je snadné připojení k dalším radarovým systémům napájených taktéž z 24V zdroje.

2.4.1 Návrh 5V a 3V3 zdroje

Napětí 12V je pro výpočetní elektroniku prakticky nepoužitelné. Tedy toto napětí je nutné snížit na 5V a 3V3 úrovně. Pro úroveň 5V jsem použil DC/DC konvertor řady LM2576T-05. Tento konvertor dokáže poskytnout maximální výstupní proud až 3A při napětí 5V. Pro tuto aplikaci je tedy bohatě dostačující.



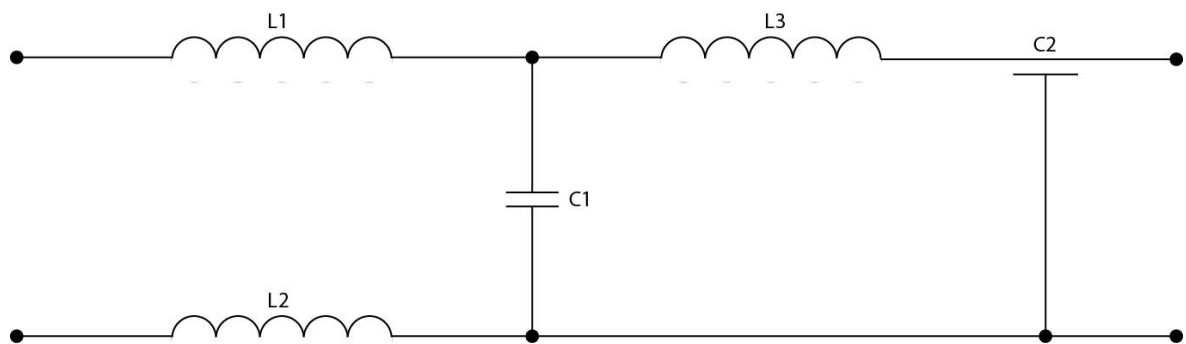
Obrázek 25: Schéma napájecích zdrojů

Obvod LM2576T-05 je zapojen do doporučeného zapojení podle datasheetu. Dioda D6 a cívka L6 jsou nutné součástky k správné funkci tohoto obvodu. Principem DC/DC konvertoru je pouze spínání napětí s velmi vysokou frekvencí, kde následující součástky mají za úkol sledovat pouze střední hodnotu tohoto napětí. Tato technologie dosahuje velmi vysokých účinností dosahujících až 75%.

Dalším obvodem pro regulaci napětí 3V3 je LT1963E-3,3. Tento obvod disponuje maximálním výstupním proudem 1,5A, dále tzv. Soft shut down vstupem. Tento vstup při $V_{in}=0V$ deaktivuje celý regulátor. Tato funkce je využita při tzv. sekvencování zapínání výstupních napětí. Důvodem je citlivost jednotlivých elektronických zařízení, které jsou

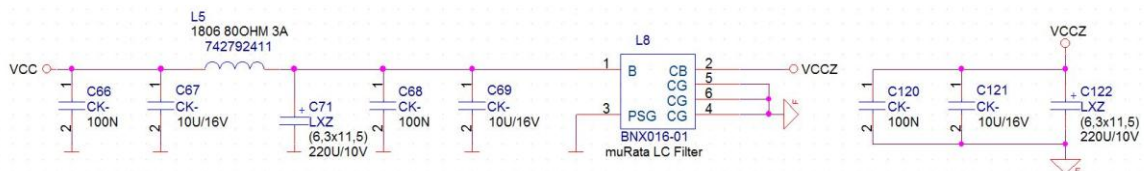
napájeny více druhy napětí. V tomto případě se jedná o ochranu desky Xilinx Zynq. Jako první napětí na jeho vstupy je přivedeno 5V. Interní reference po vyhodnocení stálosti tohoto napětí sepne signál UNCZ_PG_1V8. Toto napětí otevře tranzistor Q8, čímž se zavře tranzistor Q9. Po uzavření tranzistoru Q9 se napětí VCC přes rezistor R102 dostane do vstupu /SHDN, který následně se spustí napájecí napětí 3V3.

Jako extra aditivní filtr napájecího napětí pro A/D převodník a zesilovače jsem použil BNX016-01. Jeho náhradní schéma je na následujícím obrázku.



Obrázek 26: Náhradní schéma filtru BNX016-01

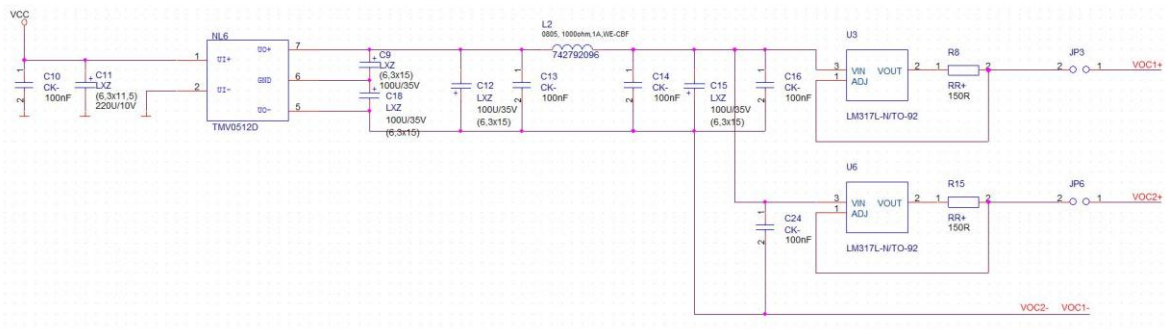
Obvodové zapojení je doplněno o dodatečné kondenzátory a cívky, pro minimalizaci zvlněného napětí.



Obrázek 27: Schéma filtru pro A/D převodník a zesilovače

2.4.2 Návrh proudového zdroje pro senzory vibrací

Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.1 o výběru vibračního čidla, je nutné napájet tento senzor zdrojem konstantního proudu.



Obrázek 28: Zdroj konstantního proudu

Z experimentálních pokusů bylo zjištěno, že napájecí napětí 12V pro zajištění konstantního proudu 8 mA nestačí. Prvním krokem je toto napětí zvýšit. Pro tento účel je použit DC/DC konvertor od společnosti TRACO. Výstupní napětí je 2x 12V, pokud se tato napětí zapojí do série, výsledné napětí bude 24V. Pro správnou funkci je velice důležité mít kvalitní vyhlazovací filtr. Pro tuto činnost je použit LC filtr zajišťující dostatečné vyhlazení výstupního napětí. Takto připravené napětí je vpuštěno do regulátoru LM317L. Regulátor je v zapojení tvořící zdroj konstantního proudu. Pro výpočet žádaného proudu je použit vztah:

$$R = \frac{I}{1,25} = \frac{0,008}{1,25} [\Omega]. \quad (1.17)$$

Výsledný rezistor je tedy 150Ω.

Ze vztahu pro LC filtr:

$$f = \frac{1}{2 * \pi * \sqrt{LC}}, \quad (1.18)$$

lze spočítat mezní frekvenci pro tento filtr. Kapacita je 100uF a indukčnost 1,6 uH. Po dosazení do vztahu 1.21 dostáváme:

$$f = \frac{1}{2 * \pi * \sqrt{1,6 * 10^{-6} * 100 * 10^{-6}}} = 12582 [Hz]. \quad (1.19)$$

Ačkoliv se tato frekvence jeví značně vysoká pro filtr typu dolní propust, je třeba si uvědomit, že hlavní zdroj rušivých frekvencí se nachází v pásmu řádově stovek kHz (DC/DC konvertory), až MHz (procesory a jiná elektronika). Hlavní výhodou tohoto typu filtru je nízký sériový odpor pro stejnosměrné složky. Velikost tohoto odporu je prakticky dána pouze z parazitního odporu cívky.

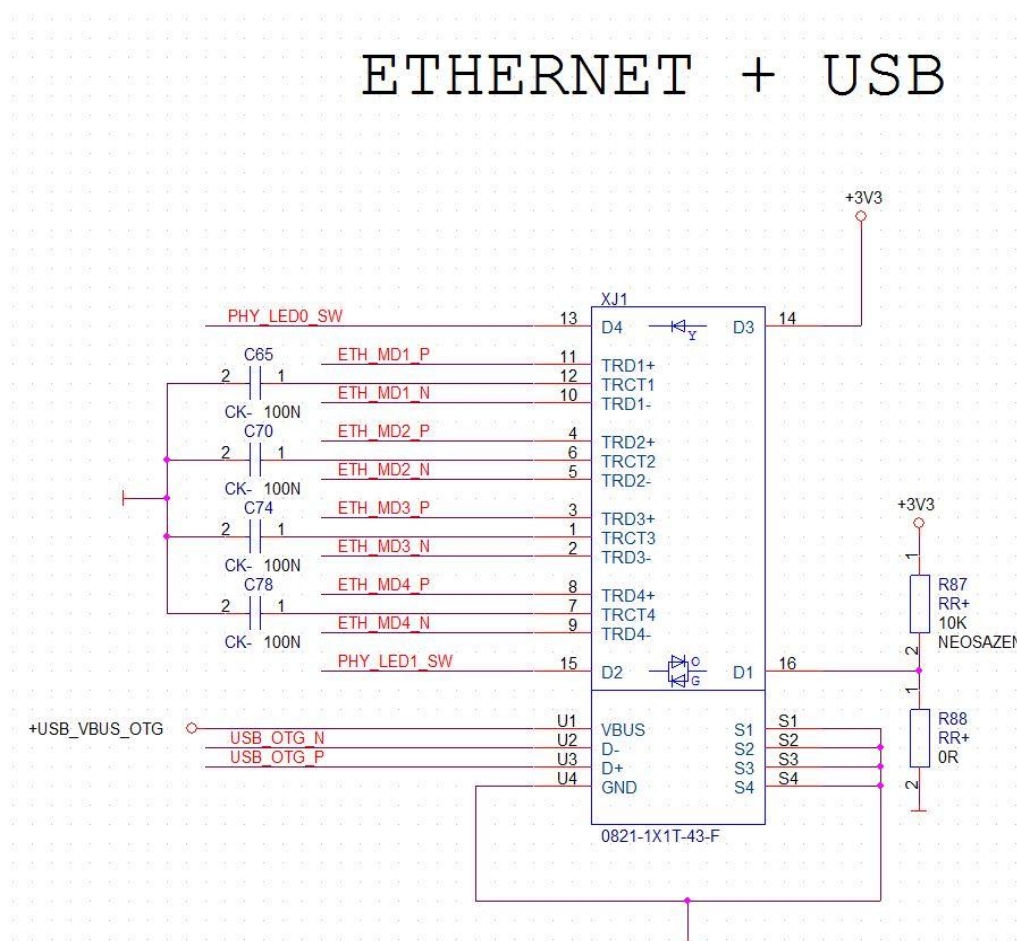
2.5 Návrh obvodů komunikace

V neposlední řadě nesmí být zapomenuto na zajištění komunikace mezi touto deskou a řídicím počítačem radaru. Pro tuto funkci jsem zvolil více možných řešení. Hlavními dvěma prvky komunikace jsou optický kabel, Ethernetový kabel (LAN). Tato komunikace je tzv. dálková. Jako lokální komunikaci bude zajišťovat sériové rozhraní a rozhraní USB.

2.5.1 USB + LAN rozhraní

Pro tento účel jsem vybral patici 0821-1X1T-43-F od společnosti Bel Fuse Inc. obsahující jak LAN konektor, tak USB. Jedná se o jednoduchý konektor využívající diferencovaných signálů pro LAN komunikaci. Jde o stejný princip, jak bylo popsáno v kapitole 2.2 o návrhu diferenčních zesilovačů. Pro komunikaci po USB rozhraní je použito stejného principu jako v případě LAN.

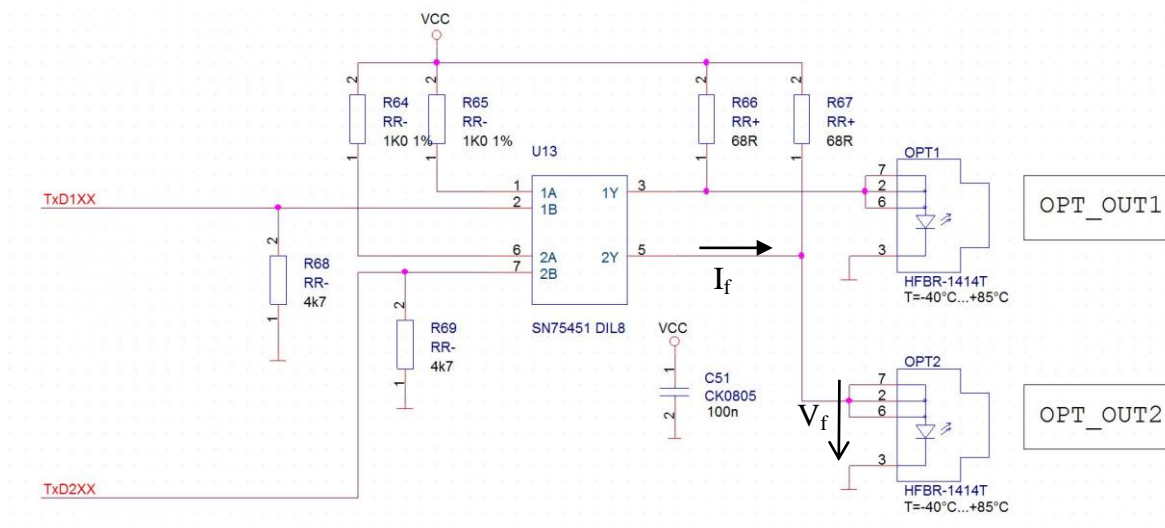
Tyto signály není již třeba nijak dále upravovat, tím pádem mohou být přímo přivedeny do desky Xilinx Zynq. Tato deska má přímo dedikované vstupní porty pro tento typ komunikací.



Obrázek 29: Schéma zapojení pro LAN a USB konektor

2.5.2 Optické rozhraní

Hlavním komunikačním prostředkem této desky je optická linka. Po této dráze bude zajištěna veškerá komunikace s řídicím počítačem. Jak již bylo zmíněno největší výhodou použití optické komunikace, je vysoká elektromagnetická odolnost EMS.



Obrázek 30: Schéma zapojení optické komunikace

Budícím obvodem pro optické výstupy je vysokorychlostní budič SN75451 od společnosti Texas Instruments. Každý z jeho výstupů je schopen dodat proud až 300mA. Zapojení na obrázku 29 je doporučené datasheetové zapojení. Velikosti rezistorů R66 a R67 jsou vypočítány na základě následujícího vztahu:

$$R = \frac{V_{cc} - V_f}{I_f}, \quad (1.20)$$

kde $V_{cc} = 5V$, $V_f = 1,5V$ a I_f pro tento typ konektoru je rovno 48 mA.

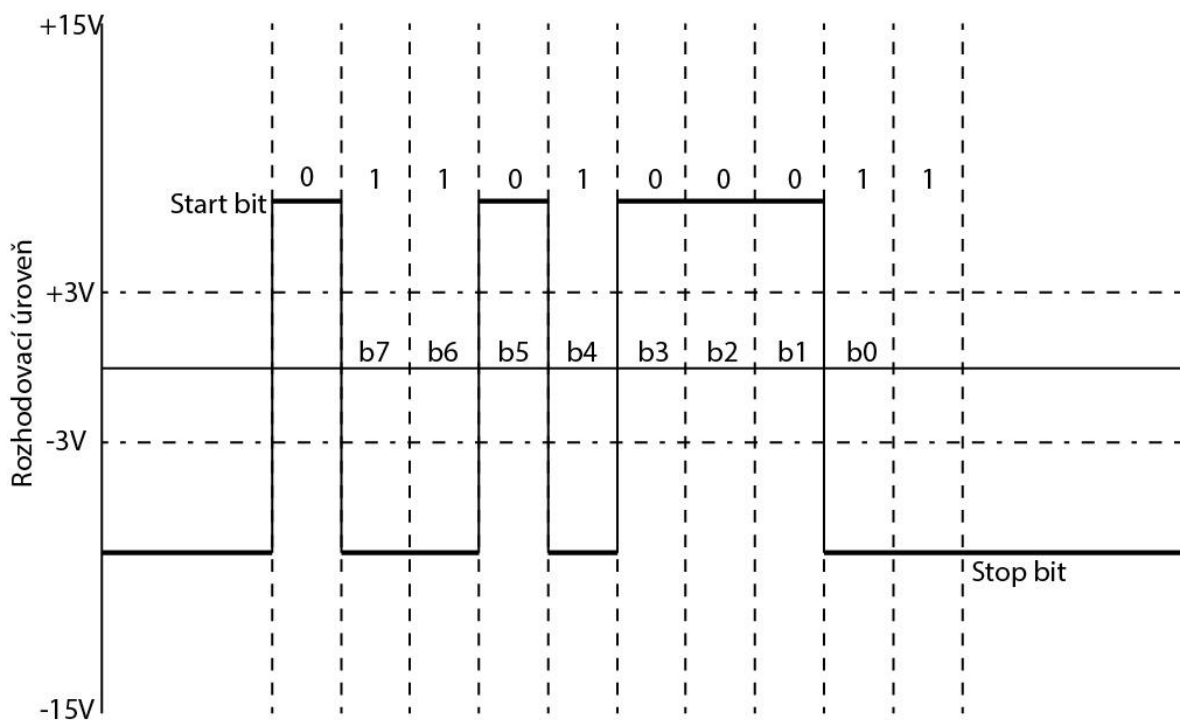
$$R = \frac{5 - 1,5}{0,048} = 73 [\Omega]. \quad (1.21)$$

Výsledný nejbližší odpor v řadě E12 je 68Ω.

2.5.3 Rozhraní RS232

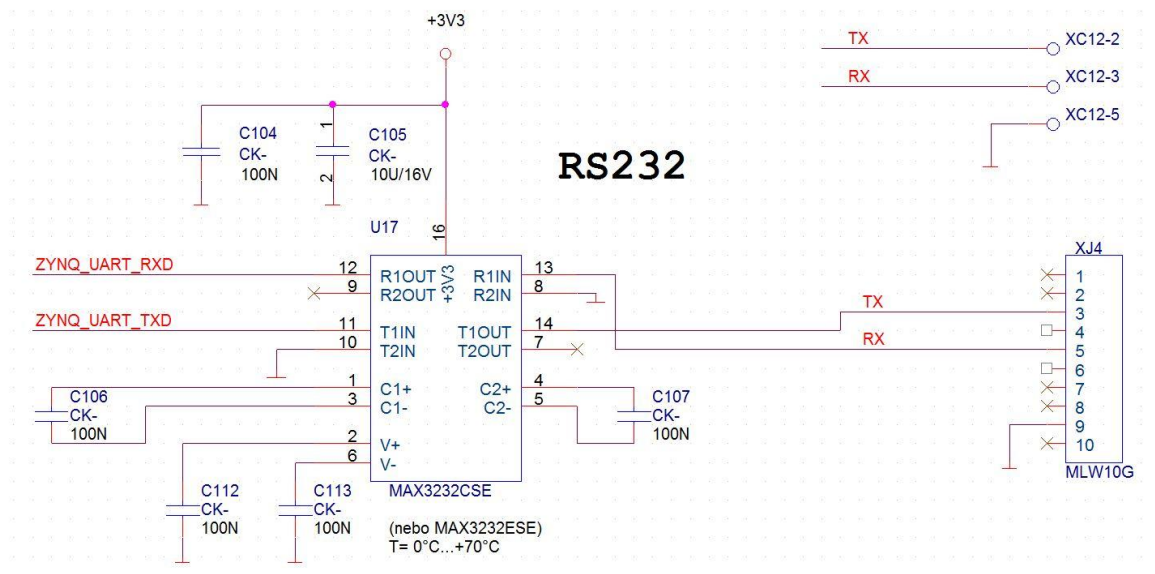
Takovou poslední záchranou při ožiování desky je sériové rozhraní RS232. Pokud by ostatní druhy komunikace z nějakého důvodu vypadly, dá se použít tato linka jako přenos dat do rychlostí až 1Mb/s.

RS232 funguje na velice jednoduchém principu. Pro komunikaci se využívá dvou datových linek Rx a Tx, přičemž každá linka je jednosměrná. Napěťové úrovně se obvykle pohybují v rozmezí pro log. 0 3V až 15V a pro log. 1 -3V až -15V. Přičemž pro zahájení komunikace je nutné vyslat tzv. start bit log. 0 a po ukončení komunikace se vyšle stop bit log. 1.[9]



Obrázek 31: Princip komunikace na RS232 sběrnici

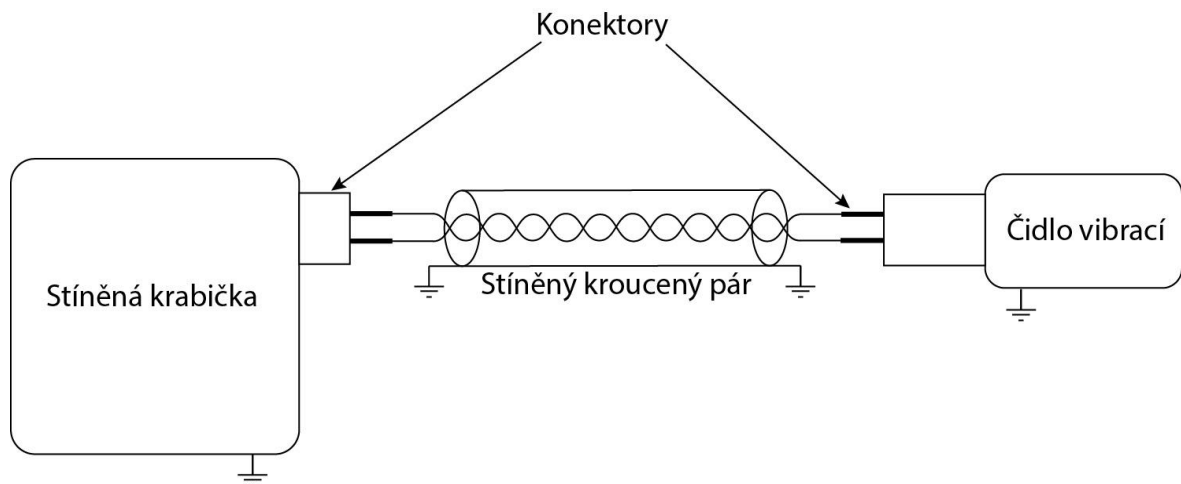
S těmito napětími ovšem Xilinx Zynq nemůže pracovat, a proto je nutné do cesty signálu vložit budič. Tento budič ze strany příjmu signálu napětí sníží na přijatelnou úroveň 3V3 a na vysílací straně napětí opět zvýší.



Obrázek 32: Schematické zapojení budiče pro RS232

2.6 Ochrana proti elektromagnetickému záření

Velmi důležitým prvkem pro získání spolehlivých dat je elektromagnetická odolnost (dále jen EMS). Samotné čidlo má podle výrobce stíněné pouzdro a všechny vystupující vodiče nemají žádné vodivé spojení s pouzdem. Ze strany čidla by tento typ stínění měl zajistit dostatečnou EMS. Další částí, kterou je nutné odstínit, je krabička obsahující všechny logické desky a to: Xilinx Zynq, desku Tweek (nese samostatně stíněné zesilovače + A/D převodník) a základovou desku, na které jsou obvody zdrojů a komunikace. Pouzdro této krabičky je vodivě přizemněno na kostru radarové antény. Poslední a asi nejdůležitější částí, kterou je nutno odstínit, je přívodní kabel od senzoru vibrací k zesilovačům. Tato část je nejkritičtější z hlediska EMS. Důvodem je délka kabelu, která se pohybuje okolo 2-3 m. Pro tento účel jsem se rozhodl použít kroucenou dvojlinku, která je doplněná o vnější kovové opletení. Vnitřní vodivý pár přenáší nezesílený signál od senzoru k zesilovačům a vnější stínění je připojeno na kostru radarové antény. Toto zapojení by mělo zajistit maximální odolnost proti elektromagnetickému rušení.



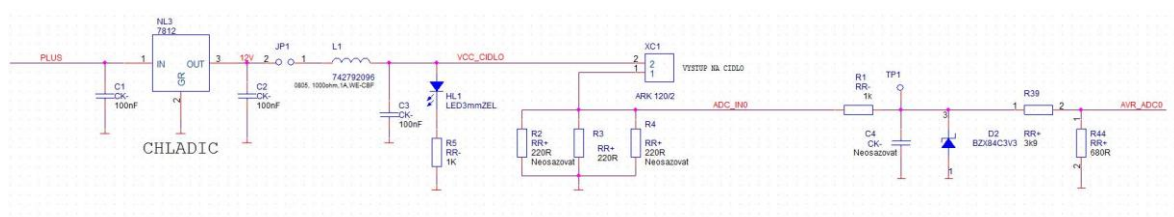
Obrázek 33: Schematické propojení vibračního senzoru a krabičky zesilovačů

2.7 Nadstavbové funkce

Po interním rozhodnutí společnosti Eldis Pardubice, s.r.o. mi bylo doporučeno převést a sjednotit na jedné desce všechna čidla pro měření různých veličin na radarové anténě. Jedná se například o měření rychlosti větru, natočení antény, nebo měření výšky hladiny oleje. Vzhledem k tomu, že toto téma není hlavním předmětem této diplomové práce, budu následující bloky popisovat jen velmi stručně.

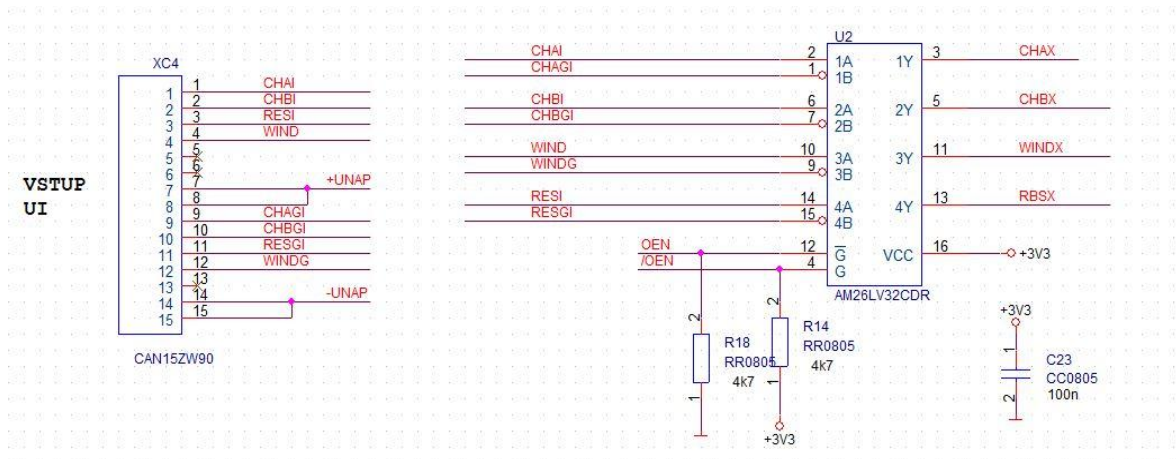
Prvním blokem je měření výšky oleje. Jedná se o kapacitní čidlo produkující pro různé výšky hladiny oleje v převodové skříni různé hodnoty proudu. Tento proud je převeden na rezistoru R3 na napětí. Při maximálním proudu 20 mA je výsledné napětí 4,4V. Toto napětí je však nutno snížit pro potřeby A/D převodníku. V tomto případě se jedná o vestavěný A/D převodník přímo na desce Xilinx Zynq. Maximální vstupní napětí do tohoto převodníku je 0,5V. Nejdříve je tedy nutné toto napětí limitovat diodou na 3,3V. Poté je do cesty vložen rezistorový dělič, kde výstupní napětí je rovno:

$$AVR_{ADC0} = \frac{R_{39} * 3,3V}{R_{39} + R_{44}} \quad (1.22)$$



Obrázek 34: Schéma zapojení olejového čidla

Dalším blokem je zpracování úhlové informace o natočení radarové antény.



Obrázek 35: Schéma zpracování úhlové informace a rychlosti větru

Tento typ čidel poskytuje přímo datové informace o stavu jejich měření ve standardu RS422. Tuto informaci stačí pouze upravit budičem AM26LV32CDR na napětí 3,3V, kde se o zpracování stará přímo Xilinx Zynq.

3 Zpracování výsledů

Z důvodu časové tísně měření probíhalo na prototypových deskách v radarové anténě. Tyto desky a přívodní kabely byly volně loženy a tedy nijak výrazně nechráněny proti elektromagnetickému záření okolních měničů a motorů. Z tohoto důvodu jsou spektra mírně zasažena šumem z okolí. Dalším problémem, se kterým je potřeba se vypořádat, je nemožnost zjistit počty zubů v první převodovce. Převodovka ZF88k4132 je kupovaná a v parametrech nejsou uváděny počty zubů, pouze převodový poměr 14,63x. Lze tedy předpokládat, že se zubové frekvence budou pohybovat řádově ve stovkách Hz. Z tohoto důvodu není nikdy možno zcela přesně určit absolutní frekvence jednotlivých ozubených soukolí. Nejlepším postupem bude tedy sledovat výrazné frekvence ve frekvenčním spektru vibrací a následně vyhodnocovat jejich změny v čase.

Ke druhé převodovce, u které je znám přesný počet zubů i převodový poměr, se pro přímé měření nebylo možné dostat. Z tohoto důvodu je předpokládáno, že se nějaké zbytkové vibrace přenáší i do první převodové skříně, ve které je možné je změřit.

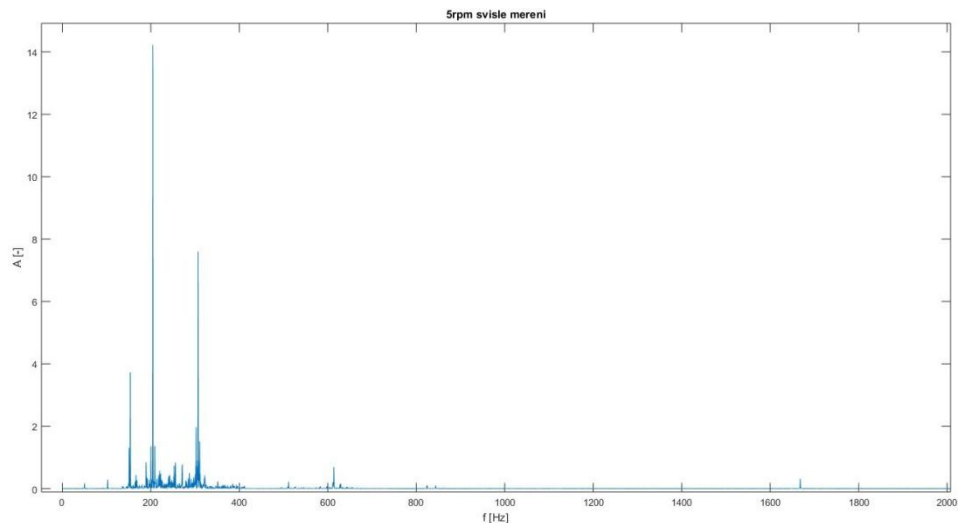
Měření probíhalo ve třech různých rychlostech otáčení radarové antény, zároveň ve vodorovném a svislém směru.

- 1) První měření bylo prováděno při nejnižší rychlosti otáčení antény, což je rovno 5rpm. Při této rychlosti je rychlost otáčení motoru rovna 490rpm.
- 2) Další měření bylo prováděno při rychlosti otáčení antény 10rpm, což odpovídá 981rpm motoru.
- 3) Poslední měření proběhlo při maximální rychlosti 15rpm, odpovídající 1455rpm motoru. To vše ve svislém i vodorovném směru.

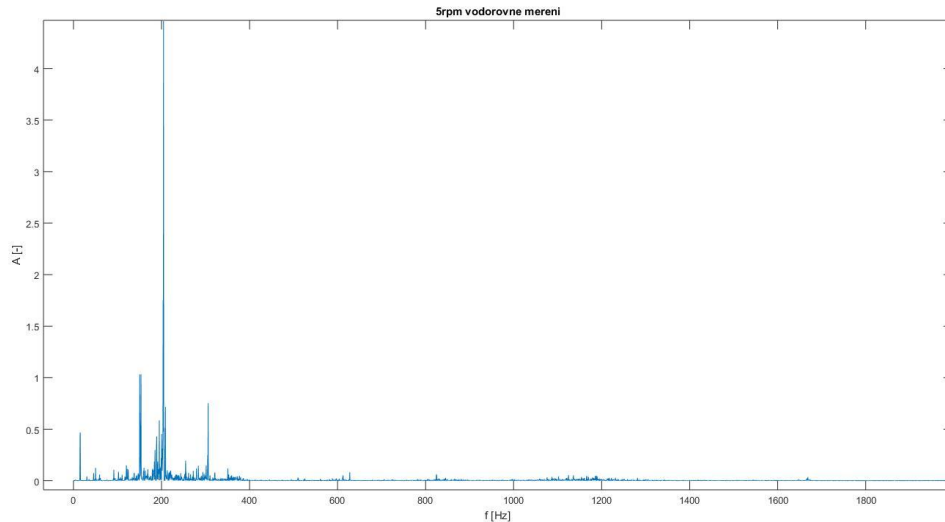
3.1 Měření při 5rpm

Z výsledků tohoto měření jsou viditelné pouze dvě dominantní frekvence, a to 200 Hz a 300 Hz. V takto nízkých rychlostech otáčení téměř nejsou patrné nesymetrie ve spektrech měřeného signálu, a tedy nelze s jistotou říci, zda je přítomna nějaká nesymetrie ozubeného soukolí. Jak již bylo dříve zmíněno při měření na této převodovce, není možné přesně spočítat předpokládané dominantní frekvence ozubeného soukolí.

Při porovnání spekter naměřených s vodorovně a svisle upevněným čidlem vibrací, je patrný velký rozdíl na frekvenci 300 Hz. Toto je pravděpodobně způsobeno horizontálně loženým soukolím, které vytváří maximum vibrací ve směru kolmém na jeho ozubení. Naopak minimum vibrací je přenášeno ve směru osy otáčení tohoto soukolí. Ve vodorovném měření stojí za povšimnutí frekvence blízké 600 Hz, viz následující obrázky.



Obrázek 36: 5rpm svislé měření



Obrázek 37: 5rpm vodorovné měření

3.2 Měření při 10rpm

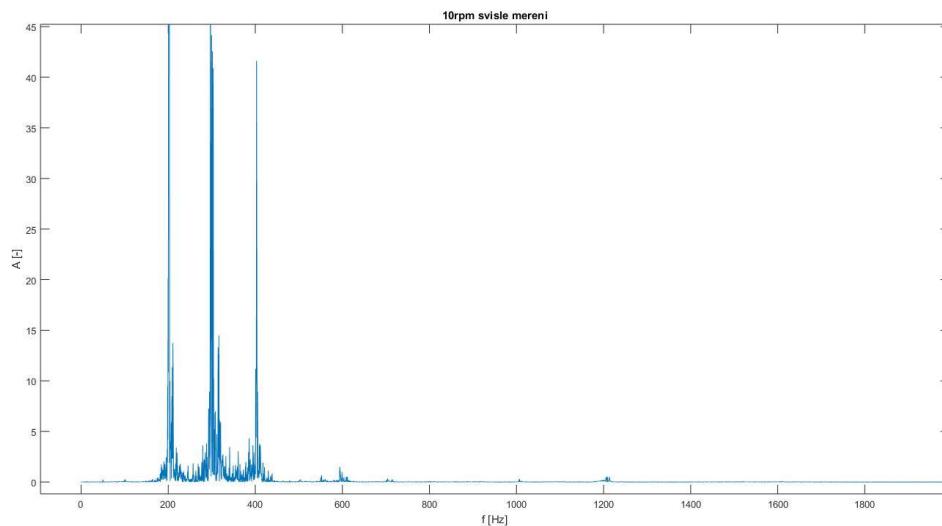
Při měření na této rychlosti je viditelné zesílení vibrací na frekvencích 200 Hz, 300 Hz a 400 Hz. Tento údaj dává najevo, že všechna soukolí i při této rychlosti zůstala v pohybu, pouze se zvýšila působící síla.

Ovšem velmi zajímavé chování nastává v oblasti vodorovného měření. Zde zůstala pouze jedna dominantní frekvence, a to 200 Hz. Všechny ostatní frekvence téměř vymizely. Zajímavou oblastí, kde se rapidně začaly objevovat nové frekvence, je okolí 1200 Hz. Lze si všimnout, že tvar tohoto spektra již není symetrický na obě strany. Z tohoto lze usuzovat, že se může jednat o lehkou nesymetrii, nebo špatné mazání ložisek viz následující obrázky.

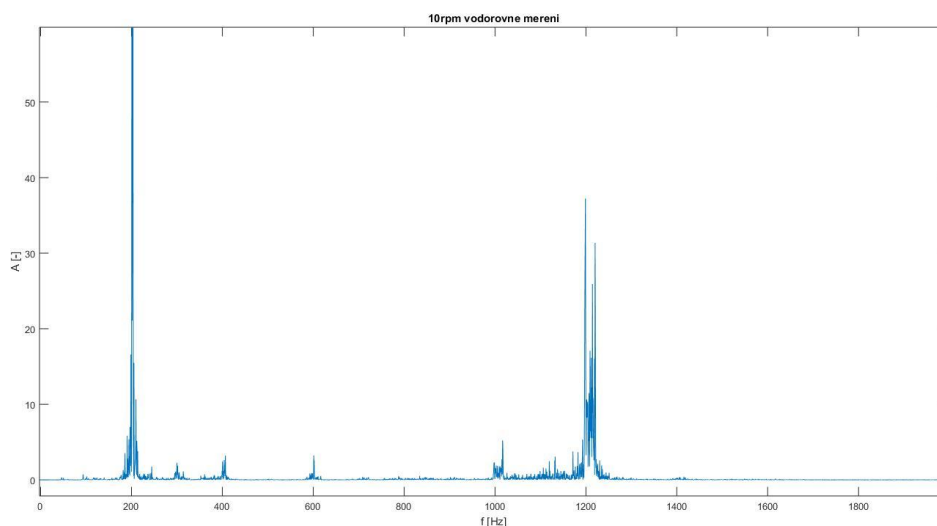
Na frekvenci 600 Hz jsem při předchozím měření 5rpm upozorňoval. Tato frekvence vibrací se při rychlosti 10rpm přesouvá na novou úroveň, kterou lze vypočítat ze vztahu

$$f_{nova} = \frac{f_{stara} * RPM_{nove}}{RPM_{stare}} = \frac{600 * 10}{5} [Hz]. \quad (1.23)$$

Výsledná frekvence je tedy 1200 Hz. Při dalším zvyšování rpm se bude tato frekvence nadále zvyšovat.



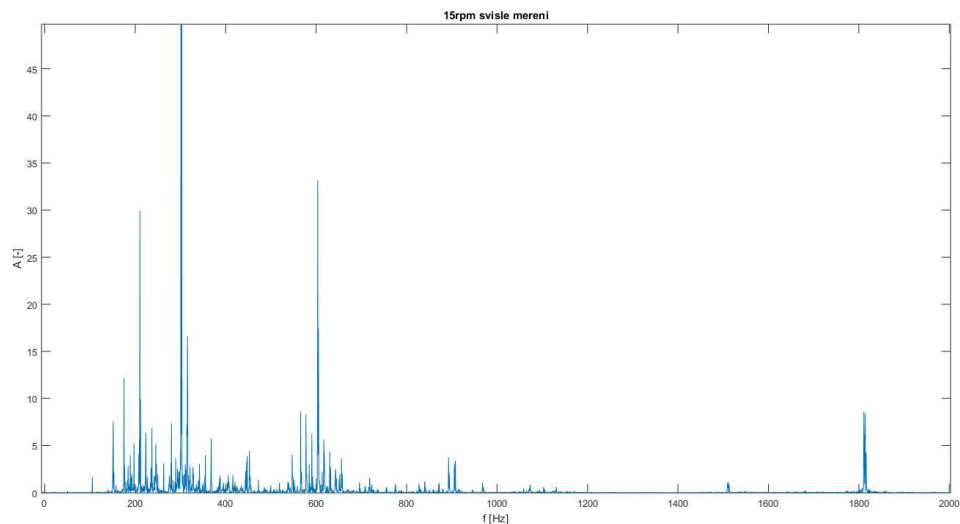
Obrázek 38: 10rpm svislé měření



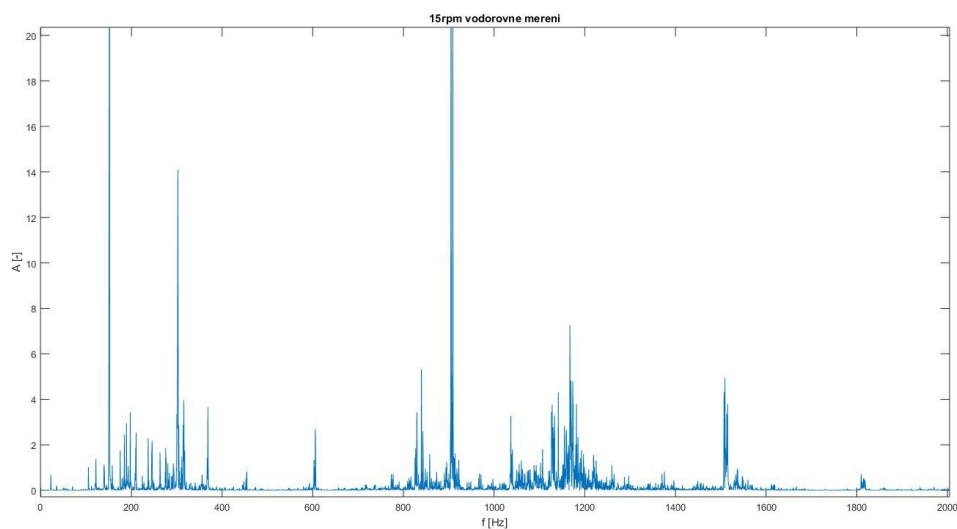
Obrázek 39: 10rpm vodorovné měření

3.3 Měření při 15 rpm

Z obou měření, a to jak ve svislém směru, tak i ve vodorovném, jsou patrné dominantní frekvence a jejich postranní pásma. Za povšimnutí stojí nesymetrie postranních pásem právě u těchto frekvencí. Zde je velmi dobře vidět, jak při maximálním zatížení 15rpm jsou tyto výchylky největší viz následující obrázky.



Obrázek 40: 15rpm svislé měření



Obrázek 41: 15rpm svislé měření

Jak bylo predikováno v měření při 10rpm, vibrace o frekvenci 1200 Hz se přesunuly na novou úroveň danou vztahem

$$f_{nova} = \frac{f_{stara} * RPM_{nove}}{RPM_{stare}} = \frac{1200 * 15}{10} = 1800 [Hz]. \quad (1.24)$$

Z této skutečnosti vyplývá, že ve spektru existují vibrace nezávislé na rychlosti otáčení 200 Hz a 300 Hz a také vibrace, velmi závislé na rychlosti otáčení ležící v rozmezí od 600 Hz do 1800 Hz.

3.3.1 Rotorová a zubová frekvence druhé převodové skříně

Jak bylo předpokládáno na začátku této kapitoly, bylo možné naměřit i zbytkové vibrace z druhé převodovky. Jejich detekce byla možná pouze při 15rpm, kde jsou vibrace nejsilnější. Při nižších otáčkách antény tyto vibrace z důvodu velice nízké amplitudy nebylo možné zachytit.

Teoreticky předpokládaná rotorová frekvence v této převodové skříně se dá vypočítat z následujícího vztahu:

$$f_{rotor} = \frac{RPM_{motor}}{60 * n} [Hz], \quad (1.25)$$

kde

- n = převodovému poměru první převodové skříně.
- RPM_{motor} = aktuálním otáčkám motoru.
- f_{rotor} = výstupní frekvenci z první převodové skříně a zároveň vstupní frekvenci do druhé převodové skříně.

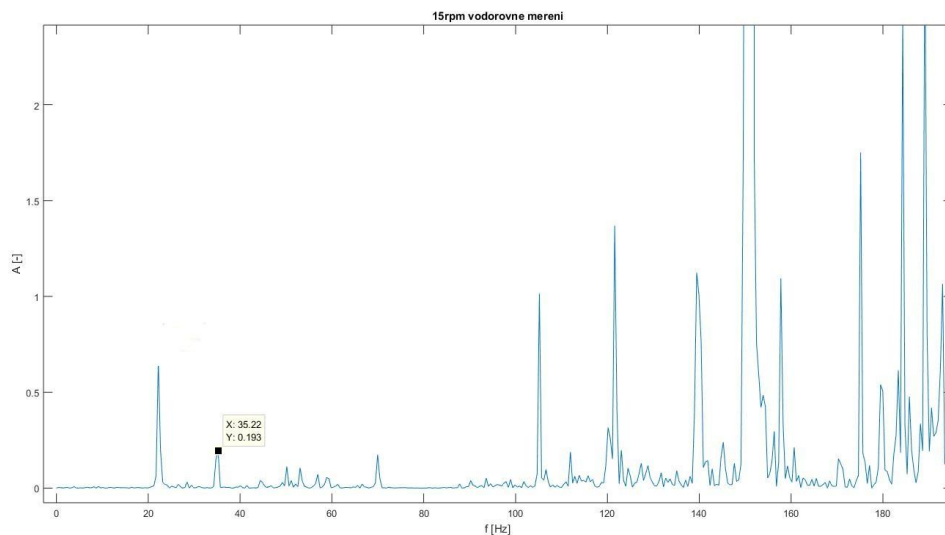
Po dosazení je výsledná frekvence rovna:

$$f_{rotor} = \frac{1455}{60 * 14,63} = 1,658 [Hz]. \quad (1.26)$$

Zubová frekvence se spočítá podle vztahu:

$$f_{zub} = f_{rotor} * N_{zubů} = 1,658 * 22 = 36,5 [Hz]. \quad (1.27)$$

Spektrální složka této frekvence je vidět na následujícím obrázku.



Obrázek 42: Detail spektra vodorovného měření

Tato malá odchylka vypočítané hodnoty od měřené může být způsobena ne zcela přesnými otáčkami motoru, nebo nepřesným převodovým poměrem první převodové skříně, anebo ne zcela přesnou vzorkovací frekvencí A/D převodníku.

4 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo navrhnout systém pro měření mechanických vibrací na radarové anténě. To vše s přihlédnutím na silné rušící elektromagnetické pole způsobené frekvenčními měniči a motory pohánějícími anténu. V první části práce jsem se zaměřil na teoretický rozbor problematiky vibrací ozubených soukolí a jejich frekvenčních vlastností. Tyto znalosti se dají velice dobře uplatnit pro měření na druhé převodové skříně s přesně známými počty zubů. Pro první převodovou skříně bude zapotřebí uplatnit jiných postupů pro analýzu vibrací z důvodu nemožnosti zjistit přesný počet zubů na všech soukolích.

Nejdůležitější částí této práce bylo navržení a oživení hardwarové části. V první řadě bylo důležité zjistit, jaký zisk zesilovačů bude zapotřebí. Toho bylo docíleno pokusným měřením za pomoci osciloskopu, kde jsem zjistil, v jakých hodnotách se obvykle pohybuje výstupní napětí z vibračního senzoru. Na základě tohoto měření již nebyl problém vypočítat potřebný zisk zesilovačů. Nakonec jsem se rozhodl pro dva zesilovací stupně z důvodu lepší stability zapojení a zároveň snazšího impedančního přizpůsobení na vstupech prvního stupně. Dalším krokem bylo navrhnout A/D převodník. Za tímto účelem jsem zvolil 24bitový převodník s maximální vzorkovací frekvencí 125 kSPS pro jeden kanál a 50kSPS pro více kanálů. Volil jsem především podle ceny a také podle vzorkovací frekvence, kde pro tuto úlohu nebylo nutné chodit do zbytečně vysokých frekvencí. Velmi náročný úkol nastal při ožívování samotného převodníku, respektive při navazování komunikace. Zde se ukázalo, že datasheetové hodnoty vždy nemusí být zcela pravdivé k produktu, který popisují. Hlavním kamenem úrazu bylo nalezení správné frekvence komunikačních hodin SCLK. V manuálu se uvádí maximální frekvence 20 MHz. Ovšem při těchto rychlostech se veškerá komunikace naprosto zhroutila. Maximální frekvence při, které převodník komunikuje je 10 MHz. Dalším obtížným úkolem bylo při ožívování prototypové desky zajistit obdélníkový tvar vysílaných impulsů. Nejen, že bylo nutné mít co nejkratší drátkové spoje mezi převodníkem a deskou Xilinx Zynq, ale také bylo nutné do cesty vložit přizpůsobovací rezistory a zároveň upravit sílu výstupů na 8mA. Bez těchto úprav překmity na signálech způsobovaly chybné čtení.

Měření převodových skříní probíhalo v Pardubicích na letišti, kde je umístěn přehledový radar RL-2000. Jak již bylo zmíněno, toto měření probíhalo na prototypových deskách. Tyto desky mají pouze minimální EMS. Z tohoto důvodu mohou být naměřené výsledky napadeny rušivými frekvencemi z okolí. I přes toto se podařilo naměřit zajímavé hodnoty na všech rychlostech otáčení antény. V budoucím rozvoji tohoto projektu je zapotřebí vyvinout

software, sledující změny spekter v průběhu času a na základě vyhodnocení těchto změn se vyhlásí varování v řídicí věži.

Literatura

- [1] Measuring Vibration with Accelerometers. *National Instruments* [online]. 2016 [cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <http://www.ni.com/white-paper/3807/en/>
- [2] Měření vibrací pro diagnostiku opotřebených strojů. *Automatizace.hw.cz* [online]. 2014 [cit. 2017-06-05]. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/mereni-a-regulace/mereni-vibraci-pro-diagnostiku-opotrebeni-stroju.html>
- [3] Měření vibrací pro diagnostiku opotřebených strojů. *Automatizace.hw.cz* [online]. 2014 [cit. 2017-06-05]. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/clanek/2007011401>
- [4] Principy akcelerometrů - 2. díl - Piezorezistivní. *Automatizace.hw.cz* [online]. 2014 [cit. 2017-06-05]. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/clanek/2007012601>
- [5] Accelerometer. *Sensorwiki* [online]. 2014 [cit. 2016-4-18]. Dostupné z: <http://www.sensorwiki.org/doku.php/sensors/accelerometer>
- [6] NĚMEČEK, Pavel a Elias TOMEH. *VIBRAČNÍ DIAGNOSTIKA ZÁKLADNÍCH ZÁVAD STROJŮ* [online]. Liberec, 2010 [cit. 2017-06-07]. Dostupné z: <http://www.kvm.tul.cz/getFile/id:1851>. TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI.
- [7] Very High Frequency ICP® Accelerometer [online]. 2011, , 1-2 [cit. 2017-06-20]. Dostupné z: <https://www.pcb.com/contentstore/docs/PCB../621B40.pdf>
- [8] Cascaded integrator–comb filter. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2016 [cit. 2017-06-27]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Cascaded_integrator–comb_filter#cite_note-Hogenauer-2
- [9] RS-232. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2015 [cit. 2017-07-16]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/RS-232>

Seznam příloh

Příloha A – Zdrojový kód SPI komunikace.....	56
Příloha B – Fotografie.....	61

Příloha A – Zdrojový kód SPI komunikace

```
-----
-- Company:
-- Engineer:
--
-- Create Date:      14:32:42 04/20/2017
-- Design Name:
-- Module Name:      Main - Behavioral
-- Project Name:
-- Target Devices:
-- Tool versions:
-- Description:
--
-- Dependencies:
--
-- Revision:
-- Revision 0.01 - File Created
-- Additional Comments:
--
-----
library IEEE;
use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
use ieee.std_logic_arith.all;
use ieee.std_logic_signed.all;
-- Uncomment the following library declaration if using
-- arithmetic functions with Signed or Unsigned values
use IEEE.NUMERIC_STD.ALL;

-- Uncomment the following library declaration if instantiating
-- any Xilinx primitives in this code.
--library UNISIM;
--use UNISIM.VComponents.all;

entity Main is
    Port (
        osc100: in std_logic;
        din_adc: in std_logic;-- data z prevodniku
        dout_adc: inout std_logic;-- data do prevodniku
        cs_o: out std_logic;-- cs pro prevodnik
        --clk15_o: inout std_logic;
        sclk_o: out std_logic;-- hodiny pro prevodnik (sclk_o)
        wr_en_o: out std_logic;
        --adr: in std_logic_vector(2 downto 0);
        --cclk: out std_logic;

        data_fifo_o: out std_logic_vector(31 downto 0)

    );
end Main;

architecture Behavioral of Main is

    signal duf_reg: std_logic_vector(31 downto 0);
    signal cit0: integer range 0 to 2;
    signal cit1: integer range 0 to 31;
    signal cit2: integer range 0 to 50000000;
    signal cit3: integer range 0 to 1;
    signal cit4: integer range 0 to 23:=23;
    signal cit5: integer range 0 to 15:=0;
    signal cit6: integer range 0 to 33;
    signal cit7: integer range 0 to 7:=7;
    signal cit8: integer range 0 to 127;
    signal cit9: integer range 0 to 15;
    signal clk20: std_logic;
    signal clk20t: std_logic;
    signal wr_en_fifo: std_logic;
    signal clk2: std_logic;
    signal nabez,sestup: std_logic;
    signal stav: integer range 0 to 20:=0;
    signal clk2t: std_logic;
    signal clk30: std_logic;
    signal clk15: std_logic;
    signal rd_en: std_logic;
    signal tst: std_logic;
```

```

signal tstd: std_logic;
signal empty: std_logic;
signal clk60: std_logic;
signal sclk_oTEMP: std_logic;
signal data_rdy: std_logic;
signal prog_full: std_logic;
signal full: std_logic;
signal dato: std_logic_vector (23 downto 0);
signal din: std_logic_vector (31 downto 0);
signal data: std_logic_vector (31 downto 0) := "00000000000000000000000000000000";
signal dout: std_logic_vector (31 downto 0);
signal data_fifo: std_logic_vector (31 downto 0);
signal blaho: std_logic;
-----
----- Pripravene registry pro nahrani
constant adr9: std_logic_vector (7 downto 0) := "01000100"; -- adresa pro cteni dat z prevodniku
constant hodnota0: std_logic_vector (15 downto 0) := "1000000000000000"; -- ADC MODE REG.
constant adr0: std_logic_vector (7 downto 0) := "00000001";
constant hodnota1: std_logic_vector (15 downto 0) := "0000100001000000"; -- "0001100111100000"; --
-- INTERFACE MODE REG.
constant adr1: std_logic_vector (7 downto 0) := "00000010";
constant adr10: std_logic_vector (7 downto 0) := "01000010"; -- adr pro cteni
constant hodnota2: std_logic_vector (15 downto 0) := "0001000000100000"; -- GPIO CONFIGURATION
REG.
constant adr2: std_logic_vector (7 downto 0) := "00000110";
constant hodnota3: std_logic_vector (15 downto 0) := "0000000000000001"; -- CHANNEL0 REG.
constant adr3: std_logic_vector (7 downto 0) := "00010000";
constant hodnota4: std_logic_vector (15 downto 0) := "1000000001100010"; -- CHANNEL1 REG.
constant adr4: std_logic_vector (7 downto 0) := "00010001";
constant hodnota5: std_logic_vector (15 downto 0) := "0000000000000000"; -- CHANNEL2 REG.
constant adr5: std_logic_vector (7 downto 0) := "00010010";
constant hodnota6: std_logic_vector (15 downto 0) := "0000000000000000"; -- CHANNEL3 REG.
constant adr6: std_logic_vector (7 downto 0) := "00010011";
constant hodnota7: std_logic_vector (15 downto 0) := "0001001100100000"; -- SETUP CONFIGURATION
REG.
constant adr7: std_logic_vector (7 downto 0) := "00100000";
constant hodnota8: std_logic_vector (15 downto 0) := "0000000000000001"; -- FILTER CONFIGURATION
REG.
constant adr8: std_logic_vector (7 downto 0) := "00101000";
signal hodnota: std_logic_vector (15 downto 0);
-----
-----

begin
process (osc100)
begin
    if rising_edge(osc100) then
        ----- Delicka na 10MHz SCLK
        if cit1 < 9 then --13
            cit1 <= cit1 + 1;
        else
            cit1 <= 0;
        end if;

        if cit1 > 4 then --6
            clk2 <= '1';
        else
            clk2 <= '0';
        end if;
        clk2t <= clk2;

        if (clk2t = '0' and clk2 = '1') then
            nabez <= '1';
        elsif (clk2t = '1' and clk2 = '0') then
            sestup <= '1';
        else
            nabez <= '0';
            sestup <= '0';
        end if;
        -----
        case stav is
            when 0 => ----- cekani 0.5s po zapnuti
                if cit2 < 50000000 then
                    cit2 <= cit2 + 1;
                else
                    stav <= 1; --1
                end if;
            end case;
        end process;
end;

```

```

end if;
cs_o <= '1';
sclk_oTEMP <= '1';
when 1 =>----- Priprava registru pro nahrani
if cit5 = 0 then
    dato <= adr0 & hodnota0;
elsif cit5 = 1 then
    dato <= adr1 & hodnota1;
elsif cit5 = 2 then
    dato <= adr2 & hodnota2;
elsif cit5 = 3 then
    dato <= adr3 & hodnota3;
elsif cit5 = 4 then
    dato <= adr4 & hodnota4;
elsif cit5 = 5 then
    dato <= adr5 & hodnota5;
elsif cit5 = 6 then
    dato <= adr6 & hodnota6;
elsif cit5 = 7 then
    dato <= adr7 & hodnota7;
elsif cit5 = 8 then
    dato <= adr8 & hodnota8;
end if;
cit4 <= 23;
sclk_oTEMP <= '1';
cs_o <= '0';
if nabez = '1' then
    stav <= 2;
    -----zakomentovat po debugu
    --dato <= adr1 & hodnota1;-- test nahravani jednoho registru
    -----
end if;
when 2 =>----- Nacteni jednoho
registru do prevodniku
--tst <= '0';
if sestup = '1' then
    sclk_oTEMP <= '0';
    dout_adc <= dato(cit4);-- nacisti registru do prevodniku
elsif nabez = '1' then
    sclk_oTEMP <= '1';
    if cit4 > 0 then
        cit4 <= cit4 - 1;
    else
        stav <= 3;
        cit8 <= 0;
        sclk_oTEMP <= '1';
        ----- odkomentovat po debugu
        cit5 <= cit5 + 1; -- pocitadlo nahraných registru
        -----
        ----- zakomentovat po debugu
        --cit5 <= 1;
        -----
    end if;
end if;
when 3 =>----- Rozhodnuti zda se budou nacist dalsi registry,
nebo se zacne vycitat z prevodniku

sclk_oTEMP <= '1';
--tst <= '0';
if sestup = '1' then
    cs_o <= '1';
    dout_adc <= 'Z';--Z
end if;
if cit8 < 127 then-- zpomaleni nahravani
    if nabez = '1' then
        cit8 <= cit8 + 1;
    end if;
end if;
----- odkomentovat po debugu
if cit8 = 127 and (cit5 < 10) and nabez = '1' then-- cit 5 musi byt o 2 vetsi nez
je pocet nahraných registru
    stav <= 1;
elsif cit5 = 10 and nabez = '1' and cit8 = 127 then
    stav <= 4; -- prechod na stav cteni z prevodniku
    --cit5 <= 1;
end if;

```

```

----- zakomentovat po debugu
--      if cit8 = 127 and nabez = '1' then
--          stav <= 4;
--      end if;
-----
when 4 =>----- cekani na data z
prevodniku
--led <= '1';
wr_en_fifo <= '0';-- konec zapisu predchozich dat
cs_o <= '0';
--tst <= '0';
sclk_oTEMP <= '1';
cit7 <= 7;
if nabez = '1' then
    stav <= 5;
end if;
when 5 =>----- Vyslani prikazu pro vycteni dalsiho datoveho slova
if sestup = '1' then

    sclk_oTEMP <= '0';
----- zakomentovat po debugu
--dout_adc <= adr10(cit7);-- comand pro vycteni dat z ADC
-----

----- odkomentovat po debugu
dout_adc <= adr9(cit7);-- comand pro vycteni dat z ADC
-----

elseif nabez = '1' then
    sclk_oTEMP <= '1';
    if cit7 > 0 then
        cit7 <= cit7 - 1;-- citac zapisu bitu pro prevodnik
    else
        stav <= 6;
----- zakomentovat po debugu
--cit6 <= 15;
-----

----- odkomentovat po debugu
cit6 <= 32;-- musi byt o jedna vesti nez je pocet bitu
-----

    sclk_oTEMP <= '1';
    end if;
end if;
when 6 =>
if sestup = '1' then
    sclk_oTEMP <= '0';
    if cit6 > 0 then
        dout_adc <= 'Z';--Z
        cit6 <= cit6 - 1;
    else
        sclk_oTEMP <= '1';
        stav <= 7;
        --data <= data + 1;--testovaci data
    end if;
elseif nabez = '1' then
    sclk_oTEMP <= '1';
    data(cit6) <= blaho;-- cit6 vycitani dat z prevodniku(din_o)
end if;
when 7 =>
--tst <= '1';
wr_en_fifo <= '1';
data_fifo <= data;-- zapis dat do fifa
stav <= 8;
--cit9 <= 0;
cs_o <= '0';--1
cit2 <= 0;
when 8 =>
--tst <= '0';
wr_en_fifo <= '0';
dout_adc <= '1';

-----odkomentovat po debugu
cs_o <= '0';
if blaho = '0' then -- cekani na dato z prevodniku
    stav <= 4;
else
    stav <= 8;

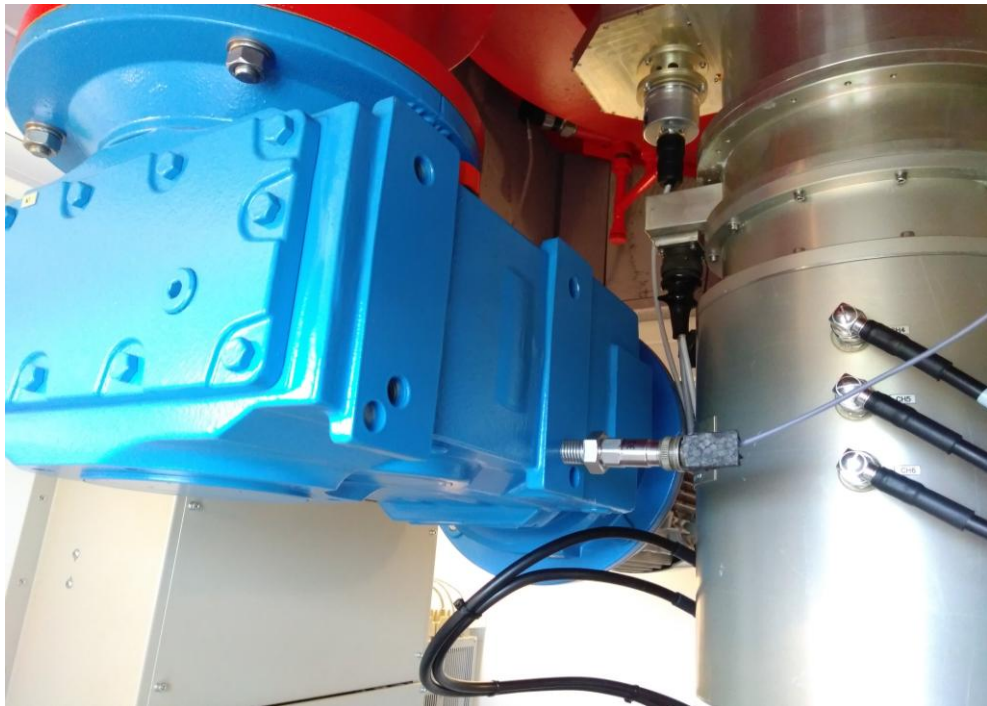
```

```

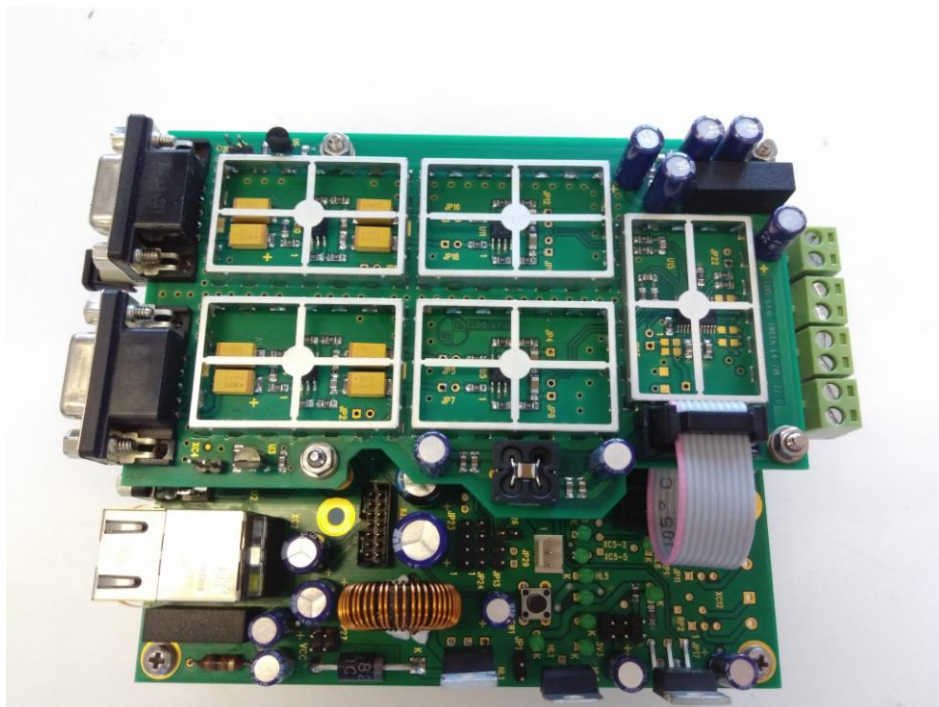
        end if;
        -----
        ----- zakomentovat po debugu
--      cit2 <= cit2 + 1;
--      if cit2 = 300 then
--          stav <= 1;
--      else
--          stav <= 8;
--          --tst <= '0';
--      end if;
--      --cs_o <= '1';
        -----
        when others =>
            stav <= 0;
        end case;
    blaho <= din_adc;
end if;
sclk_o <= sclk_oTEMP;
wr_en_o <= wr_en_fifo;
data_fifo_o <= data_fifo;
end process;
end Behavioral;

```

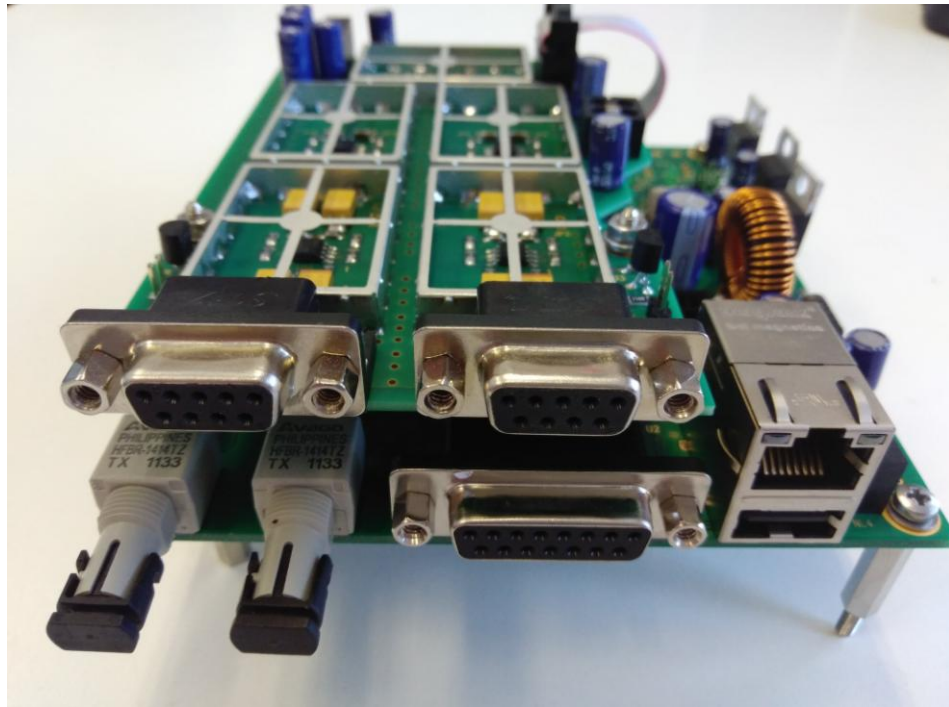
Příloha B – Fotografie



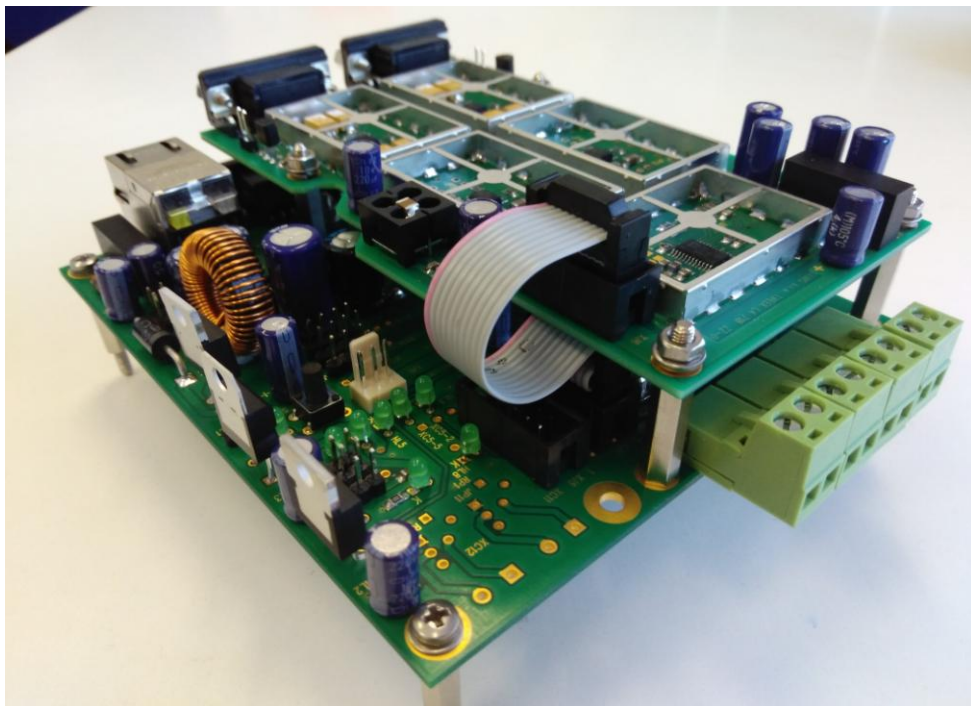
První převodová skříň



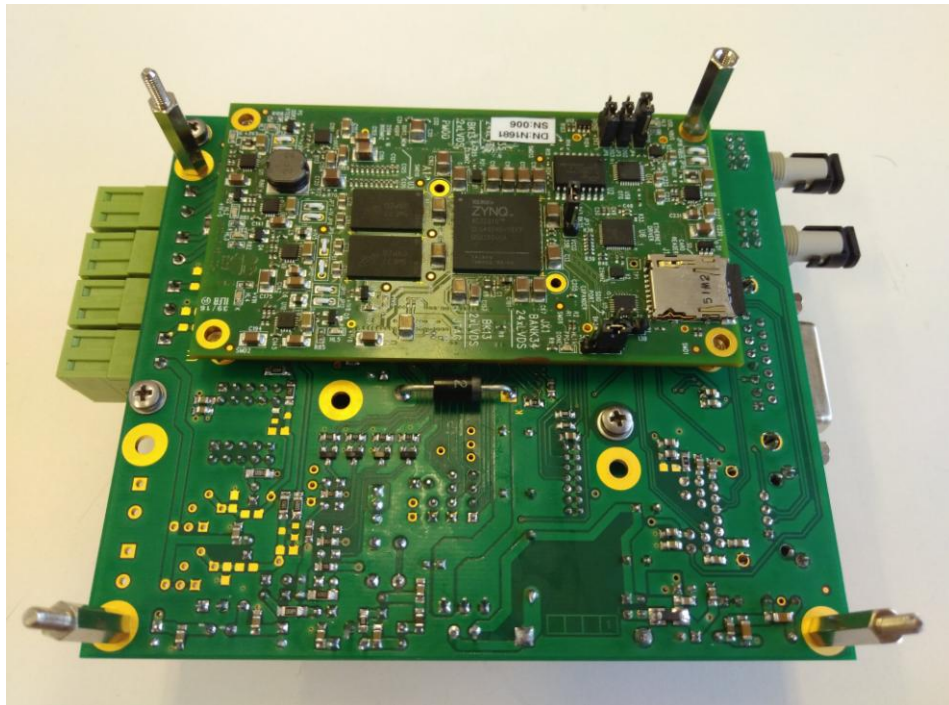
Kompletní sestava pohled ze shora



Kompletní sestava pohled zepředu



Kompletní sestava pohled zezadu



Kompletní sestava pohled zezdola



Senzor vibrací



Přehledový radar RL2000 (letiště v Pardubicích)