



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

# Zařízení na měření tremoru

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Studijní program: KME

Studijní obor: Elektronika

Vedoucí práce: Ing. Jan Havlík, Ph.D.

Tomáš Szentpétery

PRAHA 2015

## **Prohlášení autora 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.

V Praze dne .....

.....

Podpis autora práce

## **Poděkování**

Chtěl bych poděkovat vedoucímu práce Ing. Janu Havlíkovi, Ph.D. za odborné vedení, vstřícnost a konzultace během realizace diplomové práce. Děkuji Děkuji Ing. Janu Dvořákovi za podporu a rady při vývoji zařízení. V neposlední řadě děkuji své rodině za vyjádřenou podporu.

## **Abstrakt**

Práce se věnuje problematice měření tremoru, jejíž součástí je ověření spolehlivosti a funkčnosti původního měřicího zařízení. Je provedeno měření, z jehož výsledků se vyvozují možné chyby zařízení. Autor má za úkol zjistit v rámci možností příčiny chybného chování. V další části práce je proveden návrh nového měřicího přístroje. Je zavedena bezdrátová komunikace a zařízení je rozšířeno o další prvky, které mají za úkol snímat vlivy okolního prostředí. V práci je rozebrána konstrukce zařízení a chování dílčích částí. V závěru práce je provedené stejné měření na novém přístroji, jehož výsledky lze srovnat s naměřenými daty předchozího zařízení. Autor navrhuje další možné úpravy přístroje.

## **Klíčová slova**

Třes, roztroušená skleróza, bezdrátový, akcelerometr, mikrokontrolér, měření zrychlení, USB, HID, Visual Basic, aplikace

## **Abstract**

This work is focused on measurement of tremor and verifying reliability and functionality of previously tested device. There have been executed measurement of the device. Results are speculated and author is deducing according to his assignments device faults. Next part contains new design of the device. There was implemented a wireless communication and device is extended for other elements which are created to monitor environmental influences. Work includes construction of the device and behavior of its part. At the end of the work there have been executed the same measurement and its results are possible to compare with the previous ones. Author is suggesting additional adjustments of device. Author is suggesting additional adjustments of device, too.

## **Keywords**

Tremor, multiple sclerosis, wireless, accelerometer, microcontroller, acceleration measurement, USB, HID, Visual Basic, application

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Tomáš Szentpétery**

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika  
Obor: Elektronika

Název tématu: **Zařízení pro měření tremoru**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznamte se s problematikou tremoru a možnostmi měření jeho projevu.
- 2) Navrhněte hardwarové zařízení pro měření tremoru. Implementujte nutnou SW podporu.
- 3) Realizujte navržené zařízení a proveďte ověření jeho vlastností.

Seznam odborné literatury:

- [1] Ambler, Z. a kol.: Klinická neurologie. Vyd. 2. Praha: Triton, 2008.
- [2] Řasová, K.: Fyzioterapie u neurologicky nemocných (se zaměřením na roztroušenou sklerózu mozkomíšní). Vyd. 1. Praha: Ceros, 2007. 135 s. ISBN 978-80-239-9300-4.
- [3] Novotný, P.: Stanovení míry tremoru pomocí akcelerometrických senzorů. Diplomová práce, FEL ČVUT v Praze, 2012.

Vedoucí: Ing. Jan Havlík, Ph.D.

Platnost zadání: 29. 2. 2016



Prof. Inbg. Miroslav Husák, CSc.  
vedoucí katedry

Prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
děkan

V Praze dne 15. 9. 2014

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Teoretický rozbor</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Výchozí zařízení</b>	<b>6</b>
3.1	Popis zařízení . . . . .	6
3.2	Ověření funkčnosti . . . . .	7
3.3	Pravděpodobné chyby zařízení . . . . .	8
<b>4</b>	<b>Koncept nového zařízení</b>	<b>12</b>
4.1	Souhrn požadavků . . . . .	12
4.2	Filozofie zařízení . . . . .	12
<b>5</b>	<b>Obvodové prvky</b>	<b>14</b>
5.1	Bezdrátový modul . . . . .	14
5.1.1	FSK modulace . . . . .	17
5.1.2	Nastavení RF obvodu . . . . .	17
<b>6</b>	<b>Moduly zařízení</b>	<b>22</b>
6.1	Ruční modul . . . . .	22
6.1.1	Napájecí obvod . . . . .	22
6.1.2	Volba mikrokontroléru . . . . .	24
6.1.3	Akcelerometr . . . . .	25
6.1.4	Popis funkce jednotky . . . . .	30
6.1.5	Datový paket . . . . .	31
6.1.6	Schématický návrh . . . . .	33
6.1.7	Prototyp modulu . . . . .	33
6.2	Šumový modul . . . . .	33
6.3	Počítačový modul . . . . .	34
6.3.1	Návaznost na původní zařízení . . . . .	34
6.3.2	Popis USB rozhraní . . . . .	35
6.3.3	Prototyp modulu . . . . .	37
<b>7</b>	<b>PC program</b>	<b>39</b>
7.1	Výchozí aplikace . . . . .	39

7.2	Nové pracovní prostředí . . . . .	39
7.2.1	Třída HID . . . . .	40
7.2.2	Zpracování dat . . . . .	41
<b>8</b>	<b>Vzájemná komunikace modulů</b>	<b>42</b>
8.1	Rozhraní počítač a PC modul . . . . .	42
8.2	Bezdrátové komunikační schéma . . . . .	42
<b>9</b>	<b>Ověření zařízení</b>	<b>44</b>
9.1	Měření gravitačního zrychlení . . . . .	44
<b>10</b>	<b>Možnosti vylepšení</b>	<b>48</b>
<b>11</b>	<b>Závěr</b>	<b>49</b>
<b>A</b>	<b>Příloha</b>	<b>52</b>
<b>B</b>	<b>Technická dokumentace Hand Modul</b>	<b>53</b>
<b>C</b>	<b>Technická dokumentace PC modul</b>	<b>56</b>
<b>D</b>	<b>CD Příloha</b>	<b>60</b>

# 1 Úvod

Tremor neboli třes patří mezi jedno z možných onemocnění pohybového aparátu. Toto onemocnění, které je projevem choroby, postihuje ve značné míře horní končetiny a může omezit člověka v jeho běžných aktivitách a ovlivnit jeho kvalitu života.

V současné době existuje v populaci onemocnění, které se nazývá roztroušená skleróza. Jedním z projevů této nemoci je třes a s ním spojené omezené motorické schopnosti pacienta. V rámci léčby je zapotřebí co nejpřesněji diagnostikovat pacienta a stanovit rozsah onemocnění, do kterého patří klasifikace míry tremoru. Proto ve spolupráci s nemocnicí Královské Vinohrady vznikla myšlenka vytvořit zařízení, které bude schopné kvalifikovat a kvantifikovat třes.

V rámci pracovní skupiny a diplomové práce bylo vytvořeno zařízení, které pomocí akcelerometru měřilo třes horních končetin. S postupujícím časem vznikly nové požadavky na zařízení od skupiny zdravotních pracovníků. Součástí toho bylo seznámit se s používaným zařízením a upravit jej takovým způsobem, aby vyhovovalo nově vzniklým požadavkům.



## 2 Teoretický rozbor

### Tremor

Tremor neboli třes je mimovolní rytmický oscilační pohyb částí těla způsobený stahy svalů s různou frekvencí a amplitudou. Přestože charakteristiky tremoru zůstávají konzistentní, některé jeho typy nemají vždy stejný rytmus. Tremor se může vyskytovat u zdravých i nemocných jedinců a představuje jeden z nejdůležitějších příznaků neurologických poruch. Vznik tremoru je obecně popsán činností oscilátoru jako zdroje rytmické aktivity.

Některé skupiny neuronů mají zvýšenou schopnost rytmické aktivace, a pokud dojde k synchronizaci většího počtu buněk, mohou se projevit pohybovou aktivitou. Fyziologický význam oscilátoru není zcela jasný a předpokládá se, že se podílejí na jemné regulaci svalového napětí v klidu i při pohybu. U nemocných se poruší normální tlumivé mechanismy, a tak se zvýší nestabilita oscilátoru. V různých oblastech mozku vznikají odlišné druhy tremoru. Frekvenci tremoru ovlivňují délka reflexního oblouku i mechanické vlastnosti příslušného tělesného segmentu. Převzato z [1].

Z hlediska měření jsou důležité mechanické vlastnosti třesu. Ty determinují výběr měřicího elementu a souvisí se vzorkovacím teorémem. Mezi fyzikální veličiny, které náleží, třesu můžeme zařadit amplitudu a frekvenci. Amplituda stanovuje velikost zrychlení a může se pohybovat ve značném rozptylu. Frekvence třesu se podle literatury [2] pohybuje většinou v rozmezí 8 až 12 Hz. Třes lze rozdělit do několika skupin, které jsou rozlišeny podle původu vzniku třesu, jeho průběhem nebo amplitudově frekvenčními vlastnostmi.

- **Klidový tremor** se projevuje v klidu a při pohybu se snižuje nebo mizí úplně. Frekvenční rozmezí se pohybuje od 3 do 6 Hz [2]
- **Akční tremor** se objevuje při snaze pacienta udržet tělo ve statické poloze proti působení síly. Podle původu síly se třes rozlišuje na další podkategorie. Při působení proti gravitaci se jedná o *posturální tremor*, jehož frekvence je v rozmezí 4 až 12 Hz.
- **Intenční tremor** nebo také cílený tremor je spojen s pohybem a zvětšuje se při jeho dokončování. V klidu se neprojevuje. Bývá hrubý a nepravidelný, frekvence třesu se pohybuje okolo 10 Hz a s velkou amplitudou.
- **Parkinsonický tremor** je příznakem Parkinsonovy choroby. Patří mezi nejčastější druhy třesu s frekvencí v rozmezí 3 až 6 Hz. Vyskytuje se v klidu, nejčastěji s volně položenou končetinou.

- **Esenciální tremor** patří mezi projevy vrozeného onemocnění. Má proměnlivou amplitudu na frekvencích 6 až 8 Hz nebo 4 až 12 Hz podle [2]
- **Mozečkový tremor** souvisí s poškozením mozečku. Nejčastěji se vyskytuje s frekvencí do 4 Hz a může být tak intenzivní, že zabraňuje běžnému použití končetiny.

Podle výše psaného výčtu kategorií třesu můžeme zadefinovat některé podmínky, které by mělo splňovat měřicí zařízení. Literatura [1][2] popisující tremor nekvantifikuje amplitudu třesu. Protože měřicí zařízení disponuje možností zvolit citlivost (rozsah) měření, je zapotřebí počítat s možností jej podle potřeb změnit. Frekvence třesu je naopak známa a můžeme stanovit limitní parametry. Za nejvyšší frekvenci třesu stanovíme 12 Hz. O probíhajícím pohybu můžeme říci, že má charakter periodického sinusového signálu:

$$x = A \cdot \sin(\omega t) \quad (1)$$

kde  $x$  odpovídá výchylce signálu o amplitudě  $A$  při frekvenci  $\omega$  v čase  $t$ .

Z definice zrychlení platí, že se rovná druhé derivaci dráhy (v našem případě výchylky) a první derivaci rychlosti. Můžeme říci, že akcelerace pohybu se rovná (podle [1][3])

$$a = -A\omega^2 \sin(\omega t) \quad (2)$$

Pohyb končetiny při třesu můžeme převést na hodnoty obecného harmonického periodického signálu. Při jeho měření můžeme říci, že z pohledu signálové teorie probíhá vzorkování harmonického periodického signálu  $s(t)$ . Získáme hodnoty  $s(kT_v)$  za vzniku diskrétního periodického signálu. Pro analýzu dat nejsou vzorky diskrétního signálu a jeho spektra dostatečné, a proto je nutné rekonstruovat původní harmonický signál nebo jeho spektrum. Výpočet spektra harmonického nebo periodického signálu spočívá v aplikaci matematické operace nazývané Fourierova řada. Existuje spojitost mezi spektrem harmonického a diskrétního periodického signálu. Podle [4] platí, že není možné ze spektra periodického diskrétního signálu určit spektrum periodického spojitého signálu. K danému spektru existuje totiž více různých spekter, která by jej sečtením mohla vytvořit. Jednoznačné určení spektra spojitého signálu je možné pouze tehdy, je-li spojitý signál frekvenčně omezený. [4] Budeme předpokládat, že spektrum

periodického spojitého signálu nebude obsahovat kmitočty vyšší než  $f_{max}$ . Tuto podmínku je možné dodržet, protože předpokládáme nejvyšší harmonický kmitočet o frekvenci 12 Hz.

Problematika rekonstrukce signálu není předmětem této práce, je však nutné dodržet takové vzorkovací podmínky, aby rekonstrukce byla následně umožněna. Minimální rychlost vzorkování pro periodický harmonický signál je pak omezena podmínkou podle [4]

$$f_v \geq 2 \cdot f_{max} + \frac{1}{T_0} \quad (3)$$

kde  $T_0$  je perioda spojitého signálu a  $f_v$  je frekvence vzorkování, která musí být dvakrát větší než frekvence nejvyšší harmonické  $f_{max}$ . Vzorkovací frekvence by měla být minimálně 24 vzorků. Možnosti měření zrychlení jsou podrobně rozebrány v následující kapitole, která se věnuje použitému akcelerometru.

## Akcelerometr

Akcelerometr je měřicí zařízení, které slouží k měření zrychlení, vibrací nebo mechanických otřesů. V dnešní době jsou tato zařízení konstruována v integrované formě jako mikrosenzory. Zrychlení, které je měřenou veličinou, je definované jako první derivace rychlosti a druhá derivace posunutí podle času [5]

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} \quad (4)$$

Akcelerometr z mechanického hlediska je možné zadefinovat jako soustavu hmota-pružina-tlumení, kde měřicí element je tzv. zkušební hmota. Akcelerometr je tedy systém, který pracuje v obvodu tlumeného harmonického oscilátoru, jehož kmity lze popsat rovnicí:

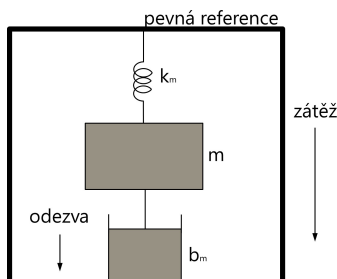
$$m \frac{d^2x_{out}}{dt^2} + b_m \frac{dx_{out}}{dt} + k_m x = -m \frac{d^2x_{in}}{dt^2} \quad (5)$$

kde  $-m \frac{d^2x_{in}}{dt^2}$  je zátěžová síla,  $x_{out}$  je relativní posuv seismické hmoty vůči pevné referenci.

Při konstantních akceleračních podmínkách je posuv  $x_{out}$  přímo úměrný vstupní akceleraci  $\frac{d^2x_{in}}{dt^2}$ , podle [5]. Platí, že

$$x_{out} = \frac{m}{k_m} \frac{d^2 x_{in}}{dt^2} \quad (6)$$

kde hodnoty  $m$  a  $k_m$  jsou konstanty, dané mechanickými vlastnostmi použitých materiálů podle obrázku.



Obrázek 1: Obecný princip akcelerometru. Zobrazení soustavy hmota-pružina-tlumení a působících sil.

Velmi rozšířené jsou akcelerometry založené na kapacitním principu. Z definice kapacity platí, že:

$$C = \frac{\epsilon S}{x} \quad (7)$$

kde  $\epsilon$  je permitivita materiálu mezi deskami kapacitoru,  $S$  je plocha snímacích elektrod a  $x$  vyjadřuje vzdálenost mezi elektrodami. Protože posuv  $x_{out}$  je úměrný akceleraci, pak platí, že inverzní kapacita každého kondenzátoru je také úměrná akceleraci:

$$\frac{\delta C}{C} = \frac{x_{out}}{x} \approx \frac{d^2 x}{dt^2} \quad (8)$$

Pro snížení teplotní závislosti dielektrické konstanty je vhodné zapojit měřicí element jako dvojici kapacitorů, které jsou mechanicky spřažené. [5]

### 3 Výchozí zařízení

Původní zařízení zkonstruované panem Novotným obsahovalo prstenec s akcelerometrem, který byl několika vodiči přímo připojen k tištěnému spoji s mikrokontrolérem. Ten pomocí USB rozhraní komunikoval s počítačovým programem, který zaznamenal přijatá data. Dle jeho zpracované diplomové práce[1] prošlo zařízení zkouškou na třepače a vibrátoru. Toto zařízení generuje kmity, které byly snímány akcelerometrem. Po provedeném měření bylo zařízení prohlášené za funkční. Nicméně vznikly pochybnosti ohledně spolehlivosti ze strany zdravotních ošetřovatelů, kteří se zařízením manipulovali.

#### 3.1 Popis zařízení

Měřicí zařízení se skládá ze tří prvků: akcelerometr, komunikační modul a počítačové rozhraní. Celé zařízení spolu s počítačovým prostředím jsem dostal k dispozici k jeho zkoumání. Podle informací z diplomové práce[1] jsem zjistil, že původně použitý akcelerometr nese označení LIS 3LV02DQ. Jedná se o tříosý akcelerometr společnosti STMicroelectronics. Z datasheetu výrobce jsem zjistil, že tento akcelerometr je dvanáctibitový. Umožňuje vzorkovat zrychlení až 640 krát za sekundu. Citlivost zrychlení je volitelná mezi  $\pm 2g$  a  $\pm 6g$ . Z další dostupné dokumentace, která obsahovala návrh tištěného spoje je patrné, že použitý akcelerometr nese jiné označení LIS331DLH. Tento akcelerometr jsem použil i ve své verzi přístroje a je podrobně popsán v následující kapitole. Ve srovnání s předchozí verzí akcelerometru je šestnáctibitový a má větší citlivost a rychlejší vzorkovací frekvenci. Tento fakt vede k otázce, jaký akcelerometr byl ve skutečnosti použit v zařízení a zda jejich technické rozdíly nezpůsobily případné chyby zařízení při jejich záměně.

Dalším dílem zařízení je komunikační modul. Jeho součástí je mikrokontrolér společnosti Microchip PIC18F4550. Vlastností mikrokontroléru je schopnost komunikovat přes USB sběrnici. V současné době se jedná o starší model, nicméně jeho použití v další verzi jsem zachoval. Mikrokontrolér při komunikaci s počítačem se klasifikuje jako USB zařízení (device) v třídě unspecified (nespecifikované), která se označuje hexadecimálním číslem 0x00. Tato zařízení potřebují ke své funkci ovladač, který se nainstaluje do systému. Společnost Microchip v rámci podpory svých produktů distribuuje zdarma ovladače pro USB rozhraní a vzorové příklady aplikací, z kterých je možné vycházet.

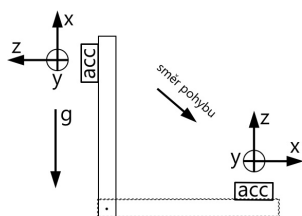
Počítačové prostředí je psané ve Visual Basicu. Jeho cílem není provádět žádné složité úlohy, proto možnosti tohoto jazyka jsou dostačující. Z celého řetězce hardwaru jsou data ve své původní podobě přenesena až do počítače, kde dochází k jejich zpracování. Protože

hardware pracuje na osmibitové úrovni a data jsou v šestnáctibitových strukturách, je zapotřebí je sloučit. Princip obou akcelerometrů je velmi podobný, proto mohu čtenáře odkázat na následující kapitolu, kde je problematika dat vysvětlena. Úkolem programového prostředí je přijmout data od mikrokontroléru, zpracovat jejich obsah a uložit je do souboru. Typické úlohy, jako je ukládání do souboru, jsou řešeny použitím příslušných knihoven. Zpracování dat z akcelerometru řeší autor pomocí konverze datových typů.

### 3.2 Ověření funkčnosti

Součástí zadání mé práce je ověření správné funkčnosti zařízení. S ohledem na doposud vykonané zkoušky jsem se rozhodl provést jiné měření. Při vývoji své vlastní verze jsem došel k závěru, že zařízení je velmi citlivé a člověk svými smysly není schopen detekovat tak malý mechanický vzruch. Výsledky měření akcelerometru na třepačce mohou být poněkud zavádějící. Měření spočívalo v umístění akcelerometru mezi dva válce, které se otáčejí definovanou rychlostí. Ve výsledcích měření autor prezentoval graf, kde je výrazně patrná frekvence kmitů. Součástí ale není zobrazení jednotlivých os, pouze jejich vektorový součet. Druhou zkouškou, které byl podroben akcelerometr, je měření na vibrátoru. Ten je schopen generovat kmity až 15 Hz a je konstrukčně uzpůsoben k měření v jedné ose. Nicméně zobrazený graf ukazuje frekvenční spektrum jen v ose Z. Tímto měřením se zjistily nekompletní dynamické parametry akcelerometru a není možné říci, jak se zařízení chová při statickém stavu nebo v jednotlivých osách.

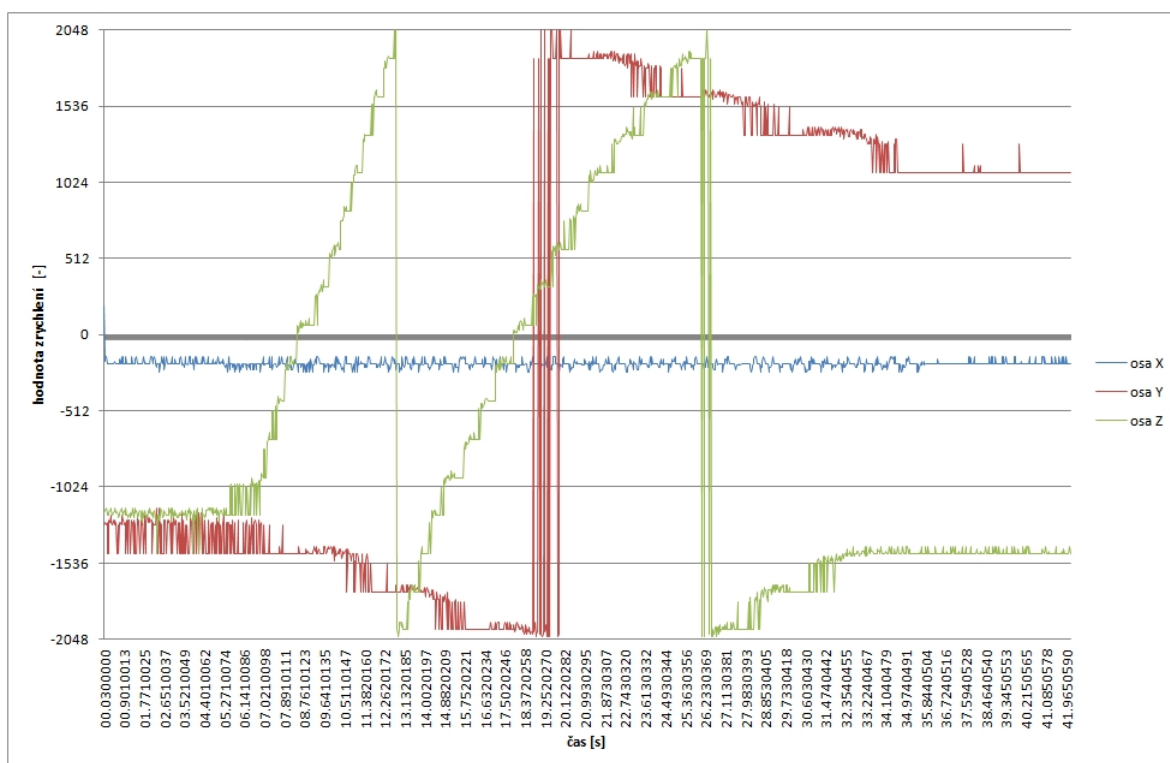
V následně vysvětleném měření jsem využil velmi prostého faktu, který je zmíněn i v datasheetu[6] výrobce. Při nehybně umístěném akcelerometru na rovné podložce, kdy osa Z bude mířit do středu země, tj. kolmo na rovinu tečnou k povrchu země, budou hodnoty zrychlení v osách x, y, z následující: 0g, 0g, 1g. V případě, že bychom umístili akcelerometr do takové polohy, že jiná z os bude mířit směrem do středu země, projeví se gravitační zrychlení v této ose. Představme si dvě polohy akcelerometru, ve kterých působí gravitační síla pouze v jedné ose, ale vždy v jiné ose, například se směru osy X a Z. Pokud máme zrychlení působící ve směru osy X a otočíme-li akcelerometr tak, že bude působit ve směru osy Z, můžeme při stanoveném natočení říci, že vektorový součet hodnoty gravitačního zrychlení pro měřenou osu bude stejný. Velikost zrychlení v ose X bude dána kosínem úhlu natočení, a velikost zrychlení osy Z bude dána sinem úhlu natočení. Vliv sinu nebo kosinu úhlu natočení na osu je dán výchozí polohou vůči působení gravitační síly. V tomto příkladu předpokládáme konstantní hodnotu gravitačního zrychlení. Situaci ilustruje následující obrázek.



Obrázek 2: Ilustrace měření akcelerometru na sinusovém stole

### 3.3 Pravděpodobné chyby zařízení

Výše popsané měření jsem uskutečnil mezi osami X,Z a Y,Z. Dle teoretického předpokladu lze očekávat výše popsané chování, nicméně výsledky byly zcela odlišné. Tato dvě měření zaručují v souhrnu změření všech tří os. V úloze je zapojena dvojice os, třetí by měla vykazovat nečinnost. Měření jsem provedl na sinusovém stole. Tato strojařská pomůcka slouží k natočení referenční plochy v rozmezí úhlů  $0^\circ - 90^\circ$ . Akcelerometr byl připevněn na zmíněnou referenční plochu. Po započatém měření byl stůl otočen o  $90^\circ$  vůči směru působení gravitačního zrychlení. Pohyb byl vykonán působením lidské síly. Její nekonstantní působení vytvářelo neplynulé natáčení, nicméně změna promítnutí gravitačního zrychlení mezi osami by měla být patrná.



Obrázek 3: Graf změny působení gravitačního zrychlení na osy X a Z v čase

Nebudeme-li brát v úvahu pojmenování os, můžeme říci, že jedna osa nevykazuje žádné změřené zrychlení. To odpovídá předpokládané skutečnosti. Červeně označená osa prochází

hodnotami přes necelou polovinu svého rozsahu. To by znamenalo že v případě rozsahu  $\pm 2g$  by změna zrychlení působícího na akcelerometr byla  $2g$ . V případě vyššího rozsahu  $\pm 6g$  by se jednalo o  $6g$ . Přibližně v prostředku grafu můžeme vidět překmity mezi maximálními hodnotami zrychlení, které zobrazují přetečení. Je otázkou jak tento jev interpretovat. V případě, že by zrychlení bylo natolik velké, že by bylo nad limit rozsahu přístroje, hodnoty registrů by byly v binární podobě samé jedničky, tj. maximální hodnoty s výjimkou znaménkového bitu, který určuje směr působení síly.

dekadická hodnota	binární, 4 řády	binární, 5 řádů
13	1101	<b>0</b> 1101
14	1110	<b>0</b> 1110
15	1111	<b>0</b> 1111
16	0000	<b>1</b> 0000
17	0001	<b>1</b> 0001
18	0010	<b>1</b> 0010

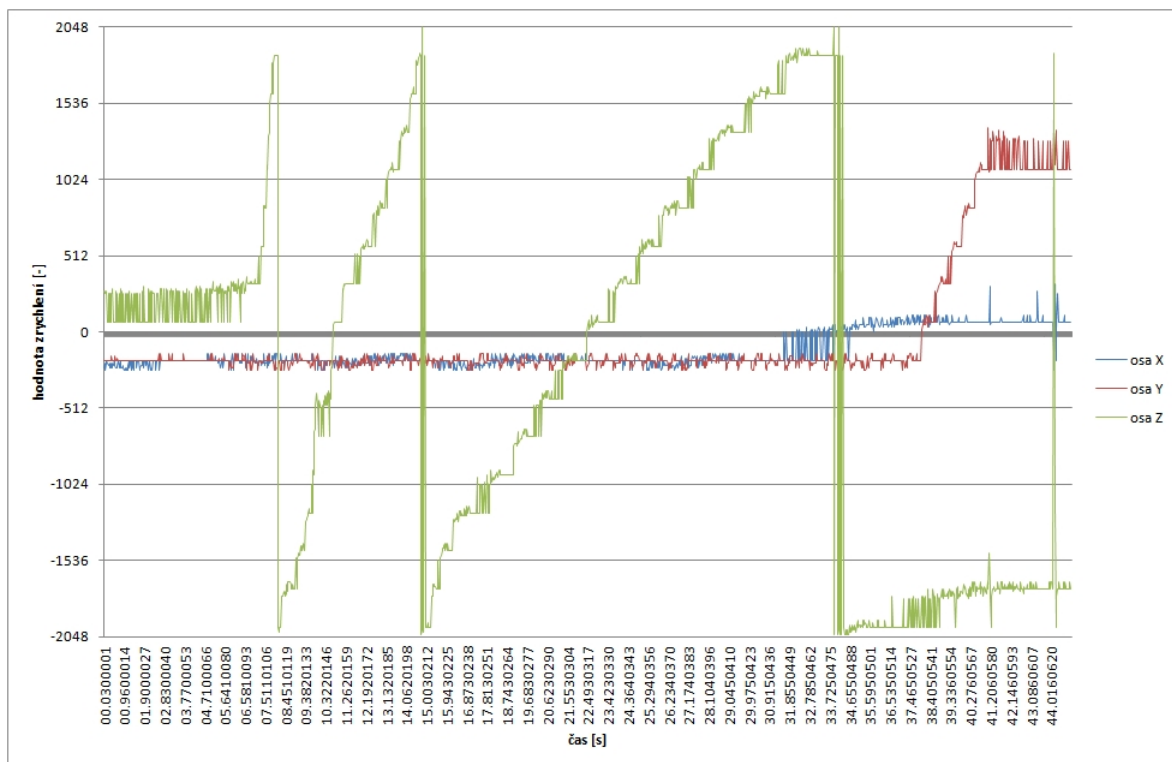
Tabulka 1: Binární interpretace čísla při zobrazení 4 a 5 řádů

Tabulka ilustruje případ, kdy rostoucí číslo, vyjádřené čtyřmi řády, dosáhne své maximální hodnoty. Dojde k jeho přetečení a následující hodnoty pokračují od začátku číselného rozsahu. Pokud má číslo větší rozsah hodnot, ale jeho interpretace pracuje s méně řády, může dojít k přetečení. V souvislosti s měřicím přístrojem by to znamenalo, že došlo k záměně původního 12 bitového akcelerometru s novým 16 bitovým. Druhé měření, které zapojí třetí osu ilustruje následující graf:

Z druhého grafu je vidět, že modře označená osa je stále neaktivní. Tak by tomu být nemělo, protože nové umístění akcelerometru bylo takové, aby na tuto osu gravitační zrychlení působilo minimálně v jedné z úvratí sinusového stolu. Naopak červeně označená osa vykazuje přesně očekávané chování. Změna hodnot o 1024 bitů by znamenala při rozsahu  $\pm 2g$  právě působení gravitačního zrychlení. Naproti tomu zeleně označená osa má velmi podobné chování jako v předchozím grafu.

Data přijatá počítačem od mikrokontroléru obsahují šest byte, z nichž dvojice přísluší jedné ose. Program při práci s přijatými daty prochází funkcí, která nejprve zpracuje byte s hodnotami vyšších řádů. V první fázi dojde ke zjištění hodnoty znaménkového bitu. Funkce vytvoří dočasnou proměnou, do níž se uloží jednička na takové řádové místo, jehož hodnotu chceme znát. Tento proces se nazývá maskování a následuje jej logická operace AND mezi dočasnou a zkoumanou proměnou. Její výsledek je vrácen funkcí, jako hodnota true nebo





Obrázek 4: Graf změny působení gravitačního zrychlení na osy Y a Z v čase

false, která odpovídá výskytu jedničky nebo nuly na zkoumaném řádkovém místě. Výsledek této funkce není však dále použitý v programu. V programu bylo zkoumané čtvrté řádkové místo vyššího byte, které odpovídá dvanáctému řádku.

Následující operace sloučí dva byte do jedné proměnné datového typu integer. Proměnná je podstoupena testování, zda je větší než číslo 2048. Pokud ano, je od této hodnoty odečtené číslo 4096. Hodnota 2048 odpovídá číslu  $2^{11}$  neboli nejvyššímu řádku binárně vyjádřeného dvanáctibitového čísla. Autor zde testuje proměnnou na přítomnost znaménkového bitu. Důvod, proč je odečítána hodnota 4096 zůstává otázkou. Původní záměr byl pravděpodobně 'překlopit' číslo do kladných hodnot. Nelze však opomenout důsledky této operace. Je třeba si uvědomit, s jak velkými čísly pracují a jakého datového typu jsou. Akcelerometrická data přicházejí jako dva byte, které jsou sloučeny do integeru. Přesto, že data procházejí přes datovou linku, nejsou v programu vyjádřena jako dekadické číslo, ale jako hexadecimální. S touto formou se pracuje i nadále. Datový typ integer, tak jak je známý z prostředí jazyka C pro mikrokontroléry, se neprojevuje stejně v počítačovém prostředí. Integer ve Visual Basicu, kde byl vytvořen program, má velikost 32 bitů. Interpretace záporných hodnot je také odlišná. Odečtení čísla 4096 od proměnné způsobilo podtečení. Předpokládá se, že program je schopen přechodu mezi číselnými soustavami a nepracuje s dekadickou hodnotou jako s hexadecimálním vyjádřením, je-li taková hodnota při výpočtu použita. Hodnota proměnné

nabyla velikosti 32 bitů a její interpretace v dekadické podobě rozhodně nesouhlasila s kladnou nebo zápornou původní hodnotou. Tento fakt jsem následně zohlednil při zpracování hodnot zrychlení v mém zařízení.

Operace slouží k dočasnému vyjmutí informace o znaménku, která jej chrání před ztrátou informace během následující operace. V druhé fázi dojde k maskování. Tato operace zapříčiní, že se přepíše pět vyšších řádů nulami. Následně je navrácena hodnota znaménkového bitu zpět do příslušného řádu. Takto upravené číslo je testované, zda je vyšší než nejvyšší možné číslo vytvořené jedenácti binárními řády. Teprve touto procedurou se rozhodne, zda bude číslo kladné nebo záporné.

Podstatná je souvislost s reprezentací dat s původním akcelerometrem LIS3LV02DQ. Ten nabízí vyjádřit změřenou hodnotu zrychlení jako dvanácti nebo šestnáctibitové číslo. V případě šestnáctibitového čísla se zaplní vyšší řády stejnou hodnotou, jakou má nejvyšší datový bit. To znamená, že pět nejvyšších řádů bude mít vždy stejnou hodnotu. Aby nedocházelo ke špatné interpretaci dat, je nutné vyšší řády anulovat při zachování hodnoty znaménkového bitu. Správnou interpretaci dat zajišťovala zmíněná funkce v počítačovém programu. Kdybychom použili místo dvanáctibitového akcelerometru šestnáctibitový, pak maskování vyšších bitů by způsobilo ztrátu informace. K takové záměně pravděpodobně muselo dojít. Napovídají tomu i výstupy z grafů a několikanásobná přetečení. Každý přechod do vyššího řádu způsobí anulování nižších řádů, jak ilustruje tabulka.

V případě, že by rozsah akcelerometru byl nastaven na nejvyšší možný a hodnoty zrychlení by byly vyjádřeny číslem do dvanáctého řádu, pak by data nemusela být znehodnocená. Vzhledem k tomu, že každý z akcelerometrů má jiné nastavitelné citlivosti a jiný počet ovládacích registrů, je velmi nepravděpodobné, že nastavení původního akcelerometru by bylo přenositelné na jinou verzi zařízení.

## 4 Koncept nového zařízení

K zadefinování nového přístroje je zapotřebí zohlednit reference od zdravotnické skupiny a její zkušenosti s doposud použitým zařízením. K očividným překážkám patří kabelové propojení jednotlivých struktur zařízení. Nejen, že určitým způsobem omezuje pohyb pacienta, ale i jeho vzdálenost od počítače.

### 4.1 Souhrn požadavků

V souhrnu požadavků nyní vyjmenuji bodově úpravy a cíle, které by mělo splnit nově vzniklé zařízení. Změny se budou týkat jak hardwarové, tak i softwarové úrovně.

Z pohledu hardwarových změn se jedná o:

- Ověřit doposud zhotovené zařízení a jeho spolehlivost.
- Bude-li to možné, zjistit potenciální zdroj problémů se současným zařízením.
- Vytvořit samostatnou měřicí jednotku vybavenou bezdrátovou komunikací.
- Vytvořit druhou jednotku, která bude schopná snímat šumové pozadí měřicího prostředí.
- Propojit jednotlivé bloky spolehlivým bezdrátovým připojením.
- Pokud to bude možné, vycházet z doposud vytvořeného zařízení.

Z pohledu softwarových změn se jedná o:

- Převést USB komunikaci zařízení na třídu HID (Human Interface Device).
- Zachovat koncept počítačového programu, ovládajícího celé zařízení.
- Odebrat z prostředí počítačového programu nadbytečná výpisová okna.

### 4.2 Filozofie zařízení

Zařízení je koncipováno jako tři samostatné jednotky, z nichž jedna je propojena pomocí USB rozhraní s počítačem. Mezi jednotkami, respektive moduly je bezdrátové propojení pomocí RF obvodu. Měřicí jednotky podléhají řízení modulu propojeného k počítači. Tento modul označuji jako PC modul a je napájen z USB sběrnice. Jeho umístění je libovolné. Předpokládá se, že při měření pacienta bude počítačový modul umístěn na pracovním stole.

Měřicí jednotka připojená k pacientovi je nazývána hand modul nebo ruční modul a je napájena z baterií. Modul bude zavěšen na krku pacienta a opatřen dostatečně dlouhým kabelem pro propojení s akcelerometrem. Výsledný modul by měl být rozměrově co nejmenší, aby nepřekážel při případné manipulaci.

Třetí jednotka se nazývá šumový modul nebo noise modul. Nepředpokládá se, že akcelerometr by byl připojen k jednotce kabelem, ale přímo konektorem na tištěném spoji. Pravděpodobné umístění zařízení je na stěně nebo v blízkosti rušivých zdrojů, mezi které patří chodba nebo dveře.

## 5 Obvodové prvky

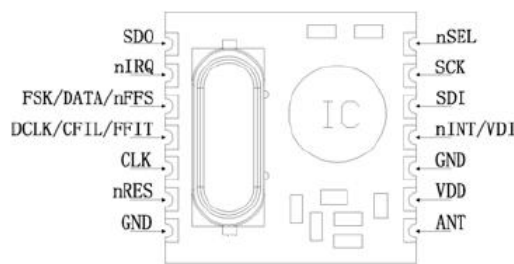
### 5.1 Bezdrátový modul

K propojení modulů jsem využil obvod RFM12B společnosti HopeRF electronic. Jendá se o malý tištěný spoj s čipem, několika smd součástkami a 14 vývody. Tento obvod (dále RF obvod) je složen z několika funkčních bloků, které slouží pro uskutečnění spojení s jiným modulem, a to v režimu vysílání nebo příjmu. Nabízí se v několika variantách, které se liší konstrukčním provedením, umístěnými součástkami nebo vysílacími parametry. Z důležitých vlastností, které bych následně rozebral, bych zmínil:

- napájecí napětí v rozmezí 2,2 - 3,8 [V],
- SPI komunikační rozhraní,
- 16 bit interní FIFO,
- FSK modulace,
- 433, 868 a 915 [MHz] vysílací frekvence,
- detekce poklesu napájecího napětí.

#### Zapojení

RF obvod disponuje několika piny, které slouží ke komunikaci s mikrokontrolerem nebo ovlivňují chování obvodu. Na obrázku je zobrazené rozložení součástek a konektorů na tištěném spoji. Piny VDD a GND jsou součástí napájení obvodu. Pro SPI komunikaci slouží piny nSEL neboli volba zařízení (jindy označované jako CS chip select), SCK (hodinové pulsy), SDI (data do obvodu), SDO (data z obvodu). Je možné využít druhý způsob komunikace, ten ovšem využívá jiné konektory a jiné funkční bloky obvodu. Dalším důležitým spojením je pin nIRQ, který oznamuje přerušování pro mikrokontrolér, a pin nRES, který slouží k hardwarovému resetu obvodu. Reset je v modulech prototypu přímo propojený s resetem mikrokontroleru, nebo je možné jej propojit s nožičkou mikrokontroleru a provádět reset nezávisle nebo jako součást běžícího programu. Pin označený FSK/DATA/nFFS je zapojený přes 10 kΩ odpor na napájecí napětí. Důvodem je volba komunikace přes SPI, která tento vývod nepoužívá a zároveň doporučení od výrobce. Funkce tohoto pinu je spojena s vnitřními bloky, které vyhodnocují, zda přijatá data lze považovat za validní nebo ne. Obvod očekává odezvu na stavy tohoto vývodu. V případě, že jej nevyužíváme, je zapotřebí použít pull-up rezistoru. Konektor



Obrázek 5: Rozložení konektorů na tištěném spoji obvodu RFM12B. Převzato z [7]

označený CLK slouží jako zdroj hodinového signálu pro mikrokontrolér. V některých aplikacích je možné sdílet oscilátor RF obvodu s mikrokontrolérem. Této funkce jsem nevyužil, ale je možné pomocí pinu CLK zjistit, zda obvod reaguje na příkazy. Pomocí vnitřních registrů lze povolit nebo zakázat hodinové pulsy na výstupu CLK pinu.

### Komunikace RF obvodu

Při komunikaci přes SPI rozhraní si vzájemně vymění RF obvod a mikrokontrolér 16 bitů. Část zprávy je adresa registru, do kterého budeme zapisovat. Ve většině případů se jedná o prvních osm bitů, které určují adresu. Zbylými byty se naplní obsah volaného registru. Tyto zprávy pro RF obvod mají společnou vlastnost a tou je, že vždy začínají jedničkou. Tím je obvod informován o tom, že bude probíhat zápis do paměti registrů. V tomto režimu obvod nevysílá žádná data do mikrokontroléru. Vyjimku tvoří příkaz pro čtení z vnitřní paměti nazývané FIFO. Prvních osm bitů zprávy vyslaných mikrokontrolérem vyhodnotí obvod jako žádost čtení z vnitřní paměti. Zbylých osm bitů neobsahuje žádnou informaci, ale obvod během této doby začne vysílat obsah své vnitřní paměti. Princip výměny dat po sběrnici SPI a jejich interpretace mikrokontrolérem jsou popsány v následující kapitole. Další výjimku tvoří čtení status registru. Ten obsahuje informace o vzniklých přerušeních a o stavech funkčních bloků, mezi které patří FIFO paměť nebo obvody ovládající příjem a vysílání dat. Jeho vysílání začíná nulou. Jakmile RF obvod registruje na datovém vodiči logickou nulu při probíhající periodě hodinového pulsu (tj. v momentě, kdy obvod vzorkuje stav datového vodiče), ihned začne odesílat data do mikrokontroléru. Je to jediná komunikace, kdy dochází k současné a vzájemné výměně dat během celých 16 bitů. Na straně mikrokontroléru však nedochází k žádné změně, obsah vysílaných dat jsou samé nuly. Tento způsob komunikace je částečně podobný s komunikací s akcelerometrem, nicméně jsou zde zásadní odlišnosti.

Status registr je velmi důležitý z hlediska obsluhy funkčních bloků obvodu. Prvním z nich je přerušení. To probíhá přechodem z logické jedničky do logické nuly na výstupu nIRQ. Jakmile mikrokontrolér obslouží rutinu přerušení ve svém programu, měl by zažádat o výpis

ze status registru. Po vyhodnocení druhu přerušení a provedení potřebným příkazů, které požaduje přerušení, dojde ke změně na logickou jedničku u pinu nIRQ. Pokud požadavek nebyl vykonán, stav status registru zůstane nezměněn, není tedy anulován po jeho přečtení. To platí i pro hodnotu nIRQ pinu. Může nastat situace, kdy dojde k přerušení z více důvodů, proto je nutné vždy vyčíst status registr a přesvědčit se o původu přerušení. Je zapotřebí obsloužit výzvu přerušení nebo se držet specifického chování obvodu. Mohlo by se stát, že výzva z přerušení zůstane zachovaná po dobu, kdy obvod přejde do nečinného stavu. Po vzniku nové relace se ihned objeví výzva předešlého přerušení, které má původ v minulé relaci. Tento jev způsobí chybné chování celého modulu. Mezi možná oznámení, která jsou pro tuto aplikaci důležitá patří:

- RGIT/FFIT - oznamuje, že paměť může přijmout další byte, který bude následně odeslán, pokud je obvod v režimu vysílání, nebo že vnitřní FIFO paměť pro příjem dosáhla nastaveného počtu přijatých bitů,
- RGUR/FFOV - značí, že v režimu vysílání jsme odeslali další byte dříve a došlo k přepsání registru, než byl jeho obsah vyslán, nebo v případě příjmu nedošlo k včasnému vyčtení FIFO a data byla přepsána,
- LBD - došlo k poklesu napájecího napětí na naprogramovanou úroveň.

Stav vnitřních bloků nebo konfiguraci zjistíme, pokud budeme sledovat hodnoty následujících bitů. Jejich změna nevyvolává přerušení. Stav bitů je dobré sledovat při odladování nastavení nebo při chybném fungování obvodu. Některé parametry nám mohou napovědět, že se chyba může vyskytovat ve zcela jiné části, než kde ji hledáme.

- POR - power on reset oznamuje, že zařízení je po resetu. Tento bit je anulován po čtení status registru.
- FFEM - paměť FIFO je prázdná.
- ATS/RSSI - Anténní obvod zaznamenal dostatečně silný přijímaný signál nebo přijímaný signál je nad úrovní nastaveného limitu. Interpretace tohoto bitu je komplikovaná. V případě, že přijímáme signál, nemůžeme jednoznačně říci, zda je signál dostatečně silný nebo je příliš silný. Obvod nenabízí výpis z registru, který by informoval o jeho síle. Lze však tištěný spoj lehce modifikovat a vyvést další výstup, který v analogové formě, tj. určitou hodnotou napětí, uvádí velikost přijímaného signálu. Jiné verze tohoto obvodu

výstup mají. Reálnou funkčnost této modifikace jsem ověřil podle osciloskopu. Hodnotu úrovně limitu přijímaného signálu lze nastavit v parametrech příslušného registru.

- DQD - data quality detektor, souvisí s níže popsány registry.
- CRL - clock recovery locked, obvod zasynchronizoval kmitočet oscilátoru s druhým obvodem, od kterého přijímá data.

### 5.1.1 FSK modulace

RF obvod pro své vysílání používá FSK modulaci. FSK (frequency shift keying) neboli frekvenční klíčování patří mezi nelineární modulace. Jak je z názvu patrné, ovládanou veličinou je frekvence. Přenos informace probíhá změnou fáze nosného kmitočtu a je nutné, aby byla frekvence spojitá po úsecích. Nejjednodušší implementací FSK je její binární podoba (BFSK), která využívá k přenosu informace dvě frekvence. Algoritmus modulování s kontinuální fází spočívá ve zjištění aktuální hodnoty fáze z generátoru modulace a přečtení odpovídající hodnoty amplitudy z paměti. V závislosti na přenášeném bitu dochází ke změně hodnoty fáze.

### 5.1.2 Nastavení RF obvodu

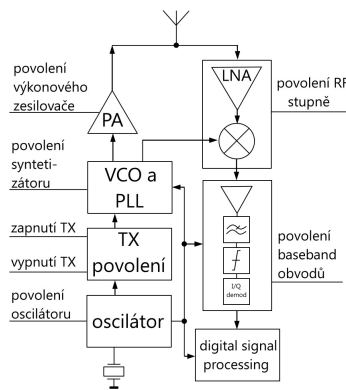
RF obvod disponuje několika vnitřními registry, kterými se nastavují parametry pro všechny funkce. Protože vnitřní konfigurace registrů je univerzální pro různé vysílací frekvence, které jsou však dány zejména vnějšími součástkami, je zapotřebí nastavit i tyto parametry. Nastavení obvodu je prováděné bez zpětné vazby, tedy není možné ověřit, zda data byla zapsána do registrů. Jediným možným způsobem kontroly je zapnutí nebo vypnutí některých periférií, které mají výstup na některý z konektorů, jako je tomu u oscilátoru, tj. pin CLK.

**Configuration setting** registr definuje, v jakém pásmu budeme vysílat. Tento parametr je dán vnějšími součástkami a pro náš případ v rámci prototypu platí nastavení na 433 MHz. Tato frekvence je k dispozici podle platného rozvržení rádiového spektra, které řídí Český telekomunikační úřad.[8] Podle způsobu, jakým chceme získávat přijatá data, je zapotřebí nastavit dva bity, které povolí FIFO paměť pro příjem a interní registr pro odesílání dat. Tyto bity jsou součástí řetězce nastavení, které je zapotřebí pro spuštění jednoho z komunikačních režimů. Mohou tedy sloužit jako spouštěče celého vysílacího nebo přijímacího řetězce. Dalším parametrem je tzv. crystal load capacitance. Jsou to kondenzátory připojené mezi pinem krystalu a zemní úrovní napájecího napětí. Velikost kapacity je možné měnit podle zadané hodnoty čtyř bitů v registru. Hodnoty se pohybují od 8,5 do 16 [pF]. Možnost měnit kapacitu



má význam nejen při měnících se teplotách, ale při stárnutí krystalu. Podstatné je, aby při zvolené hodnotě kapacity měl oscilátor stabilní pulsy na výrobcem stanovené frekvenci, která je 10 MHz. Funkčnost krystalu byla ověřena při zapojení RF obvodu do modulu a měření na osciloskopu tuto frekvenci potvrdilo. Proto jsem použil výrobcem doporučenou kapacitu 12,5 [pF], která je uvedena v dokumentaci k RF obvodu. [7]

**Power management** registr slouží k zapínání jednotlivých bloků pro příjem nebo vysílání. Některé bloky je zapotřebí spouštět v určité souslednosti, jiné lze zapnout libovolně. Možnost zapnout jednotlivé součásti individuálně hraje roli při časté změně z vysílacího režimu na přijímací a naopak. Část obvodů je společná pro obě části, a je proto možné je ponechat trvale zapnuté. Bloky, které je zapotřebí ovládat, jsou: oscilátor, syntetizér, zesilovač. Další bloky jsou součástí celého vysílacího nebo přijímacího řetězce.



Obrázek 6: Logické propojení mezi kontrolními bity power management registru; podle [7]

**Frequency settings** registr slouží k volbě střední frekvence syntetizátoru, která má souvislost s výslednou vysílací frekvencí obvodu a je dána:

$$f_0 = 10 \cdot C_1 \cdot \left( C_2 + \frac{F}{4000} \right) [MHz] \quad (9)$$

Parametr F, který se zadává do registru, je dvanáctibitové bitové číslo. Velikost  $C_1$  a  $C_2$  jsou dány vnějšími kondenzátory a pro výpočet mají pevně stanovené hodnoty  $C_1 = 1$  a  $C_2 = 43$  pro pásmo 433 MHz. Tímto nastavením je možné zvolit vysílací frekvenci v rozmezí 430,24 MHz až 439,757 MHz.

**Data rate** registr definuje rychlost přenosu v daném kanále. Je to množství přenesených bitů za sekundu. Tento parametr úzce souvisí s následujícími registry a chováním RF obvodu při odesílání dat. Z pozorování SPI linky logickým analyzátozem při plnění vnitřního odesílacího registru je patrné, že doba mezi žádostmi o další plnění paměti je úměrná zvolené bitové rychlosti přenosu dat. Platí zde omezující podmínka:

$$\frac{\Delta BR}{BR} < \frac{1}{29 \cdot N_{bit}} \quad (10)$$

kde  $BR$  je bitová rychlost přijímače a  $\Delta BR$  je rozdíl bitové rychlosti mezi přijímačem a vysílačem.  $N_{bit}$  je maximální počet po sobě jdoucích jedniček nebo nul v datové řetězci. Tato podmínka je stanovená kvůli synchronizaci hodin oscilátoru.

**Receiver control** registr slouží k nastavení přijímacích parametrů. Souvisí právě s výše psaným *data rate* registrem. Zde je zapotřebí nastavit parametr VDI (valid data registr neboli detekce validních dat) definovaný dvoubitovou hodnotou. Tato veličina není kvantifikovaná žádnou jednotkou. Existují čtyři stavy, jejichž hodnota je součástí multiplexeru. Spolu s dalšími hodnotami od vnitřních obvodů vytvářejí stav na výstupu pinu VDI. Pomocí tohoto a dalších parametrů může mikrokontrolér vyhodnotit, zda přijatá data lze považovat za správná. Dále je zapotřebí nastavit přijímací pásmo přijímače. Tento parametr se odvíjí od bitové rychlosti. Ze spektrálního hlediska lze říci, že vyšší rychlost přenosu způsobuje vyšší harmonické frekvence ve spektru a úměrně tomu je zapotřebí rozšířit přijímací pásmo. Tato hodnota vyjádřená třemi bity však nemá žádnou matematickou souvislost uvedenou v manuálu výrobce. Existuje několik internetových skupin zabírajících se nastavením modulu RFM12B. Veškeré jejich poznatky jsou získány exaktně nebo na základě manuálů k jiným verzím RF modulu. Pásmo příjmu je možné zvolit v rozmezí 67 až 400 [kHz] celkem v šesti hodnotách. Dále je nutné nastavit citlivost přijímače. Hodnota je vyjádřena relativně k maximální citlivosti přijímače. V neposlední řadě je parametr detektoru RSSI. Touto hodnotou ovládáme úroveň, kterou obvod vyhodnotí, jako dostatečně silný signál. Je zapotřebí zohlednit fakt, že příliš nízká hodnota by způsobila zahrnutí okolního šumu a příliš vysoká hodnota by mohla být nad limit vysílaného signálu. V prvním případě by došlo k chybnému příjmu dat, v druhém by nebyl vyhodnocen příjem dat vůbec. V praxi se osvědčilo, že tato hodnota není příliš významná na vzdálenostech do 10 m.

**Data filtr** registr nastavuje detekční parametry přijatých dat. Pro odchycení hodinového signálu přijatých dat lze vybrat rychlý nebo pomalý způsob nastavení. To se odvíjí od délky preamble, kterou budeme vysílat. Volíme zde digitální nebo analogový filtr. Analogový filtr požaduje další externí součástky a smysl má při nastavení bitové rychlosti na 115 kbps a vyšší. V našem případě není zapotřebí takové nastavení, a proto jsem použil digitální filtr. Zároveň se zde nastavuje DQD (data quality detector), jež je připojen k demodulátoru a indikuje příjem FSK modulovaného signálu. Nastavením parametru definujeme, jak čistý příchozí signál má být, aby byl považovaný za dobrý.

**FIFO and Reset** registr ovládá vnitřní paměť příjmu. Zde se nastavuje počet přijatých bitů, po jehož dosažení se vyvolá přerušení. Protože je paměť šestnáctibitová, prahová hodnota je nastavená na zaplnění paměti jedním byte. Po vyvolání přerušení musí mikrokontrolér vyčíst přijatá data. Během této doby dochází k zaplňování dalších 8 bitů paměti FIFO. O mechanismus přidělování jednoho nebo druhého byte paměti se stará RF obvod. V případě druhého způsobu komunikace s obvodem jsou data ihned odesílána přes datový pin a vnitřní paměť se nepoužívá. Při obsluze paměti FIFO, tj. před jejím použitím, je zapotřebí ji zresetovat. To se provádí vymazáním a opětovným nastavením příslušného bitu v tomto registru.

Komunikace vzhledem ke struktuře dat probíhá způsobem, že po zapnutí vysílacího řetězce se paměť automaticky naplní hodnotou 0xAA. V binární formě je to hodnota 1010 1010. Tento byte se nazývá preamble. Je to redundantní přenesená informace a při výčtu paměti FIFO se uživateli nezobrazí. Protože je to pravidelné střídání jedniček a nul podle stanovené bitové rychlosti, slouží preamble k synchronizaci hodin. Úspěšné odchycení jejich frekvence se objeví jako bit CRL ve status registru. Dalšími odeslanými daty jsou 2 byte nazývané synchronizační šablona (synchro pattern). Jakmile je tento byte přijatý, od toho okamžiku bere RF obvod další data jako obsah určený uživateli. V tomto registru lze nastavit, zda synchro pattern bude jeden byte nebo dvojice byte. První je definovaný výrobcem, druhý je volitelně zapnutý a může být i volitelně definovaný pomocí dalšího registru. Využil jsem možnosti použít dva byte a u druhého jsem zvolil výrobcem doporučenou hodnotu.

**AFC** registr nabízí nastavení synchronizace hodinového signálu. AFC znamená automatické ladění frekvence, někdy je obvod zajišťující tuto funkci nazýván Automatic Fine Tuning. Je zde možné nastavit dobu, kdy je hodnota frekvence hodin vypočítána a jaká je doba její životnosti.

**TX configuration** registr definuje parametry FSK modulace. Tímto registrem nastavíme reálnou vysílací frekvenci. Tu lze vypočítat podle vzorce:

$$f_{out} = f_0 + (-1)^{SIGN} \cdot (M + 1) \cdot (15kHz) \quad (11)$$

kde  $f_0$  je frekvence nastavená v *frequency setting* registru jako centrální frekvence syntetizátoru. Exponent *SIGN* je hodnota jednoho bitu, který ve výpočtu způsobí kladnou nebo zápornou odchylku od hodnoty  $f_0$ . Veličina  $M$  je čtyřbitové číslo, které nastavuje velikost odchylky. V tomto registru se také nastavuje výstupní výkon vysílače.

### Anténa

Nejjednodušší anténou, kterou lze RF modul vybavit, je monopól vyrobený ze silnějšího drátu, aby byl mechanicky odolnější. Nejčastěji volená délka monopólu je  $\lambda$ ,  $\frac{\lambda}{2}$  nebo  $\frac{\lambda}{4}$ . Uživatelsky přívětivější je použít čtvrtvlnný monopól, kvůli jeho délce. Pro vysílací frekvenci 433 [MHz] odpovídá  $\frac{\lambda}{4}$  monopól délce 172,81 [mm] podle:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{300 \cdot 10^6}{434 \cdot 10^6} = 172,81[mm] \quad (12)$$

kde  $c$  je rychlost světla.

## 6 Moduly zařízení

### 6.1 Ruční modul

Jedním z hlavních kritérií, kladených na tento modul, je energetická náročnost. Pro potřeby měření, pro které bude zařízení použito, jsem zvolil napájení z primárních baterií. Jsou cenově dostupné a mají dostatečnou kapacitu. Baterie bude zcela jistě ovlivňovat hmotnost celého zařízení, avšak umístění zařízení na pacientovi se předpokládá na místě, kde nebude nijak ovlivňovat měření. Modul obsahuje tři stěžejní komponenty, jejichž napěťové a proudové požadavky je nutné zohlednit. Jedná se o akcelerometr, mikrokontrolér, vysílací RF obvod. Souhrn limitních operačních parametrů je v tabulce.

Zařízení	Označení	Napětí minimální [V]	Proud maximální	Podmínky
Mikrokontrolér	PIC16F1827	1,8	2,5 mA	Fosc = 16 MHz
Akcelerometr	LIS331DLH	2,16	250 $\mu$ A	Normal mode
RF obvod	RFM12B	2,2	26 mA	TX mode @ 433 MHz

Tabulka 2: Minimální napětí a maximální odběrové proudy pro stěžejní komponenty modulu

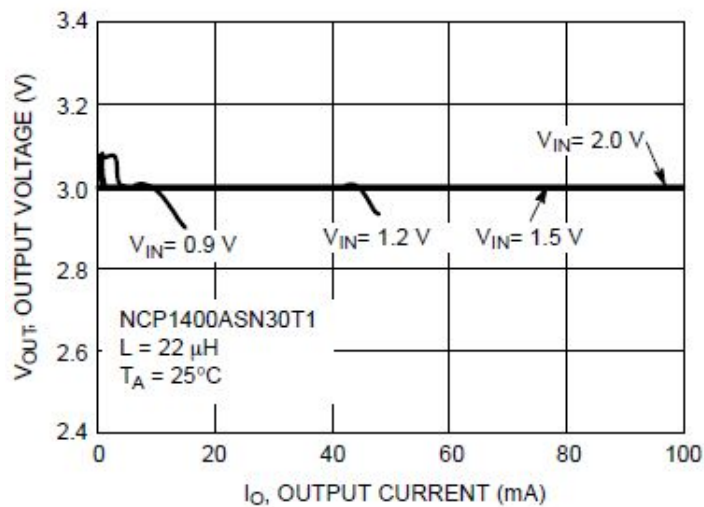
Tyto hodnoty jsou výčtem maximálních proudových odběrů v dané konfiguraci při dodržení vypsane podmínky z posledního sloupce a jsou výčtem minimálních napětí pro správnou funkci daného komponentu. Pro akcelerometr a RF obvod jsou podmínky jednoznačné. Normal mode u akcelerometru vystihuje režim popsany níže v následující kapitole. Podmínky RF obvodu jsou při režimu vysílání, který je náročnější než režim příjmu. Podmínka se vymezuje také na frekvenci obvodu 433 MHz. U mikrokontroléru nejsou limitní parametry jednoznačné. Dokument [9] obsahující elektrické specifikace mikrokontroléru popisuje různé konfigurace. Avšak možností nastavení je mnohem více. Výše vypsane parametry se vztahují k nastavení, které bylo použito při odlaďování obvodu.

#### 6.1.1 Napájecí obvod

Primární baterii dodávající energii jsem zvolil v podobě dvou tužkových baterií velikosti AA sériově řazených, jejichž výstupní napětí by mělo být v součtu 3 V, podle parametrů udaných výrobcem. Vzhledem k existenci vnitřního odporu baterie, který se začne po zatížení projevovat, klesá výstupní napětí. Tento efekt se při odběru proudu přibližně 50 mA pro jednu tužkovou baterii začne projevovat ihned. Výsledkem je pokles výstupního napětí a

baterie ztrácí schopnost dodávat i konstantní proud. Proto ji nelze ani částečně přirovnat k ideálnímu zdroj napětí či proudu. V této aplikaci je zapotřebí zajistit minimální napětí 2,2 V pro odběr 35 – 45 mA. Hodnotu proudu nelze stanovit jednoznačně, protože RF obvod má jiné proudové požadavky v režimu vysílání a v režimu příjmu. Navíc je jeho použití vždy periodické s dobou stand-by režimu, kdy jsou v obvodu zapnuté pouze některé komponenty.

Vzhledem k vlastnostem primárních článků jsem zvolil použití step-up DC-DC měniče. Obvod dovede zajistit konstantní výstupní napětí až do zatížení 100 mA při vstupním napětí minimálně 2 V dle tabulkových hodnot přiložených k obvodu. Při předpokládaném odběru zařízení 40 mA, může obvod pracovat při minimálním vstupním napětí 1,2 V.

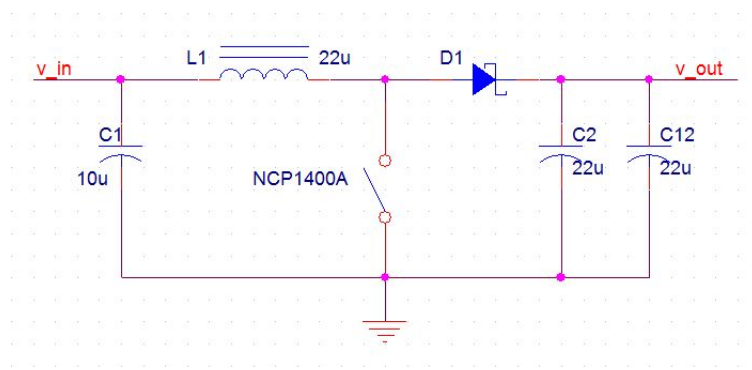


Obrázek 7: Závislost výstupního napětí na výstupním proudu pro vzorová vstupní napětí [10]

Step-up měnič NCP1400A je v principiálním zapojení na obrázku. Samotný obvod je generátor pulsů, jejichž šířkou ovlivňuje proudové zatížení obvodu. Obvod se chová jako spínač, který pracuje ve dvou stavech. V rozepnutém stavu je zátěž napájena z výstupního kondenzátoru. Dioda brání, aby se proud vracel zpět do zdroje. Ve stavu sepnutého spínače teče proud přes sepnutý spínač do cívky, která slouží jako akumulátor energie. Na konci sepnutého cyklu se hodnota indukovaného napětí sčítá s hodnotou napětí zdroje. Cívka spolu se zdrojem tvoří sérii zdrojů, které pouští proud pro zátěže a výstupního kondenzátoru. Výsledná hodnota výstupního napětí je pak vyšší než hodnota vstupního napětí. Pro konstrukci obvodu je vhodné použít kondenzátory s nízkým ESR<sup>1</sup>.

Tomu nejlépe odpovídají tantalové kondenzátory. Pro větší potlačení ESR je možné zařadit více kondenzátorů, paralelně propojených. Je nutné použít diodu, jejíž doba zota-

<sup>1</sup>ESR neboli ekvivalentní sériový odpor je parazitní vlastnost kapacitních a indukčních komponentů elektrických obvodů [11]



Obrázek 8: Principiální zapojení step-up měniče

vení je kratší než doba spínání. Pokud by tomu tak nebylo, v době, kdy spínač je sepnutý, by byl kanál vodivý a proud by tekł zpět do zdroje. [11] Celé zapojení zdrojové části je na společném schématu.

### 6.1.2 Volba mikrokontroléru

Mikrokontrolér v tomto modulu nepotřebuje žádné neobvyklé funkce, proto prioritou při výběru byla jeho cena a spotřeba. Společnost Microchip, jejíž mikrokontrolér jsem použil, nabízí mikrokontroléry s technologií nanoWatt XLP, která se vyznačuje nízkou spotřebou. Mikrokontrolér především využívá SPI komunikace, pro obsluhování akcelerometru a RF obvodu. Disponuje dvěma nezávislými SPI rozhraními, avšak použil jsem pouze jedno.

### SPI protokol

SPI komunikace je rozšířený protokol, který se převážně používá v duplexním režimu. Čítá celkem čtyři vodiče pro komunikaci mezi dvěma zařízeními: CS (chip select), CLK (clock), MISO (master in slave out), MOSI (master out slave in). Jak je patrné z názvů vodičů, komunikace je hierarchicky rozdělená a je řízená jedním hlavním zařízením (master), které může mít několik přidružených zařízení (slave). Úměrně počtu vedlejších (slave) zařízení pak narůstá počet CS vodičů, které určují, jaký obvod je v aktivním stavu.

- CS - Jakmile master zahájí komunikaci, slave naslouchá na komunikačních vodičích a patřičným způsobem odpovídá. Protože všechna zařízení, která jsou ke sběrnici připojená, mají společné datové a hodinové vodiče, CS odlišuje, pro které zařízení jsou data určena. Zahájení komunikace je tedy stav udaný vodičem CS. V obvyklé konfiguraci je to přechod z logické 1 do logické 0. V tento moment zařízení očekávají průběh hodin na vodiči CLK a výměnu dat na vodičích MISO a MOSI.
- CLK - Master zařízení je zodpovědné za generování hodinového signálu, který pro

osmibitovou komunikaci čítá osm pulsů. Je třeba definovat sestupnou nebo vzestupnou hranu hodinového pulsu jako okamžik, kdy zařízení čtou nebo odesílají data. Zároveň se definuje logický stav při nečinnosti hodinového vodiče. Tyto dva parametry mohou ve své vzájemné kombinaci posunout interpretaci hodinového signálu o půl periody pro dané zařízení.

- MOSI/MISO – jsou vodiče nesoucí data. Podle nastavení mohou být data odesílána MSB<sup>2</sup> bitem jako prvním nebo LSB<sup>3</sup>. V okamžiku, kdy sběrnice rozpozná příchod očekávané změny na hodinovém vodiči, odešle zařízení jeden bit. Zároveň očekává příchod jednoho bitu od druhého zařízení. Výměna dat probíhá současně.

Sběrnice SPI pracuje částečně nezávisle na hodinách mikrokontroléru. Mikrokontrolér obsahuje osmibitový registr, který po jeho naplnění začne odesílat data podle zvolené rychlosti, která je vždy podílem kmitů krystalu, který udává hodinový kmitočet pro mikrokontrolér. Jakmile se registr zaplní, mikrokontrolér se dále věnuje následujícím instrukcím. V případě, že byla data odeslána, byla i přijata. Proto mikrokontrolér vystaví bit, který informuje, že přenos byl dokončen.

Zařízení, která využívají SPI sběrnici v této aplikaci mají výhradně šestnáctibitový přenos. To by se mohlo zdát jako komplikace pro mikrokontrolér, který odesílá nebo přijímá 8 bitů. Ve vzorových řešeních pro RF modul, které nabízí výrobce, je uveden způsob komunikace, který nevyužívá SPI na straně mikrokontroléru. Využívá libovolných pinů mikrokontroléru, které simulují přenos tak, jak se chová sběrnice. Při samotné komunikaci je ale mikrokontrolér zaneprázdněn např. časováním mezi změnami logických hodnot pro hodinový signál. Další možností je zachovat použití MSSP<sup>4</sup> modulu a vyslat za sebou dva osmibitové řetězce. Nežádoucí je vzniklá mezera mezi jednotlivými byte, která je zapříčiněná obsluhou registrů. Avšak z pozorování chování sběrnice na straně řídicího modulu i přijímacího modulu nejsou tyto časové prodlevy závadné. Přenos dat nebyl chybný ani v případě, kdy doba prodlevy přesáhla desetkrát dobu periody jednoho hodinového signálu.

### 6.1.3 Akcelerometr

K výčtu stěžejních informací byl vybrán tříosý akcelerometr LIS331DLH společnosti STMicroelectronics. Jeho výběr byl podmíněný zkušeností s jeho funkčností z předešlého zařízení a

---

<sup>2</sup>MSB neboli Most Significant Bit je bit s nejvyšším řádem.

<sup>3</sup>LSB neboli Least Significant Bit je bit nejnižšího řádu.

<sup>4</sup>MSSB (Master Synchronous Serial Port) je seriové synchronní rozhraní, které umožňuje komunikovat s okolními zařízeními. Obsahuje modul SPI a I<sup>2</sup>C.



i vzhledem k jeho dostatečným vzorkovacím vlastnostem. Samotný akcelerometr je umístěn na malém tištěném spoji, který je opatřen konektorem a jehož rozměr je vhodný pro vsunutí do prstence, který se nasazuje pacientovi. Konektor čítá šest vodičů, mezi nimiž jsou dva napájecí a čtyři přísluší sběrnici SPI. Z energetického hlediska se jedná o součástku, jejíž nároky jsou nejnižší. Akcelerometr nabízí několik výkonových módů, z nichž běžné nastavení odebírá proud  $250 \mu\text{A}$ . Termín běžné nastavení nebo běžný provoz označuje konfiguraci akcelerometru, která se nastavuje v jeho registrech. Tímto režimem se zajistí spolehlivé vyčítání os při stanovených rychlostech vzorkování v rozmezí 50 až 1000 vzorků za sekundu. Další volbou nastavení je nízkoenergetický režim, při kterém je odběr proudu zařízení  $10 \mu\text{A}$  a je limitován rychlostí měření zrychlení na 10 vzorků za sekundu.

### **Vlastnosti akcelerometru**

Zařízení nabízí širokou škálu nastavení. V samotném základu nabízí výčet ze tří os, které lze samostatně vypnout. Každá osa je reprezentovaná šestnáctibitovým číslem, které vyjadřuje hodnotu změřeného zrychlení. Ta je uložena do dvou registrů, které jsou pojmenovány podle osy a písmene:

- H jako high pro vyšší řády zrychlení,
- L jako low pro nižší řády zrychlení.

Data je možné ukládat dvěma způsoby. Hodnoty nižších řádů se uloží do nižšího registru (označeného L), nebo do registru vyšších řádů (označeného H). Z hlediska výčtu registrů se jedná pak o prohození obsahu mezi registry H a L každé osy. Nastavení bylo použité standardní, tedy nižší řády do nižších registrů. Ovšem toto nastavení může mít v určité aplikaci své opodstatnění, není tomu tak v našem případě. Zařízení má možnost nastavení měřicího rozsahu, a to vždy v rozmezích:  $\pm 2\text{g}$ ,  $\pm 4\text{g}$  a  $\pm 8\text{g}$ .

### **Interpretace dat**

Pro správnou interpretaci dat je nutné znát citlivost zařízení pro daný rozsah. To uvádí tabulka 3. Citlivost uvedená v tabulce platí při dvanáctibitové reprezentaci. Pro větší rozsah měření připadá větší hodnota zrychlení na jeden digit neboli na jednu jednotku stupnice. K dispozici máme omezené množství čísel, kterými můžeme vyjádřit zrychlení. Pro změnu hodnoty v registru vyjadřující zrychlení musí senzor zaznamenat větší působení síly na snímací člen, aby se hodnota změnila.

Nastavení FS bitů	rozsah zrychlení [g]	min [mg/digit]	typ [mg/digit]	max [mg/digit]
00	±2	0,9	1	1,1
01	±4	1,8	2	2,2
11	±8	3,5	3,9	4,3

Tabulka 3: Citlivost akcelerometru v závislosti na rozsahu, podle [6]

zrychlení	registr LOW	registr HIGH	sloučená hodnota	binární vyjádření
0g	0x00	0x00	0x0000	0000.0000.0000.0000
1g	0x00	0x40	0x4000	0100.0000.0000.0000
-1g	0x00	0xC0	0xC000	1100.0000.0000.0000
350mg	0xE0	0x15	0x15E0	0001.0101.1110.0000
-350mg	0x10	0xEA	0xEA10	1110.1010.0001.0000

Tabulka 4: Tabulka vzorových hodnot akcelerometru, převzato z [12]

V souvislosti s tím vyvstává otázka, zda je akcelerometr skutečně šestnáctibitový. Dostupná technická dokumentace[6] k akcelerometru je nekonkrétní. V datasheetu výrobce neuvádí bitovou hloubku převodníku hodnoty zrychlení. Jediná poznámka uvedená hned zkraje dokumentace říká, že akcelerometr má šestnáctibitovou reprezentaci. To je velmi zavádějící informace. Proto bylo zapotřebí provést konkrétní měření s akcelerometrem. Doplňující literatura uvádí několik příkladů změřených zrychlení a jejich hodnoty v hexadecimálním tvaru v registrech.

Z vlastního měření a tabulky je patrné, že čtyři nejnižší řády jsou vždy nulové. Je tomu proto, že akcelerometr obsahuje ve skutečnosti dvanáctibitový převodník, jehož nejvyšší řád není uložen na pozici  $2^{11}$ , nýbrž na  $2^{15}$ . Tímto schématem jsou přemapované všechny další bity. Pro čtyři nejnižší bity neexistují data z převodníku a tyto řády jsou vždy zaplněné nulou. Výsledná hodnota je vyjádřena jako šestnáctibitové číslo, které je násobkem své reálné hodnoty.

Binární vyjádření hodnot ilustruje práci se znaménkovým bitem. U uvedeného zrychlení  $\pm 1g$  je vidět změna bitu v nejvyšším řádu. Zrychlení  $\pm 350mg$  zobrazuje, jak je vyjádřena záporná hodnota. Číslo vyjadřující kladné zrychlení má svůj protějšek opatřený negovanou hodnotou a vystaveným znaménkovým bitem. Tomuto způsobu vyjádření kladného a záporného čísla se říká dvojkový doplněk. To je velmi důležité neopomenout při zpracování dat. Je lepší si představit příklad v menším měřítku. Budeme-li mít hodnotu binárního čísla vyjádřenou čtyřmi řády, kde nejvyšší bit vyjadřuje znaménko, pak pro dekadické číslo 6 máme podobu rovnou 0110. Hodnota -6 je vyjádřena znaménkovým bitem a negovanými

třemi nižšími řády, tj. 1001. Dekadicky vyjádřené toto číslo v kladných hodnotách je rovné číslu 9. Abychom mohli s číslem efektivně pracovat, stačí získat informaci o znaménkovém bitu, který značí mínus, a kladnou hodnotu odečíst od nejvyššího možného kladného čísla vyjádřeného všemi řády včetně znaménkového.

$$0110 \rightarrow 6$$

$$1001 \rightarrow -6 \rightarrow 9$$

$$1111 \rightarrow 15$$

$$15 - 9 = 6 \text{ znaménkový bit} \rightarrow -6$$

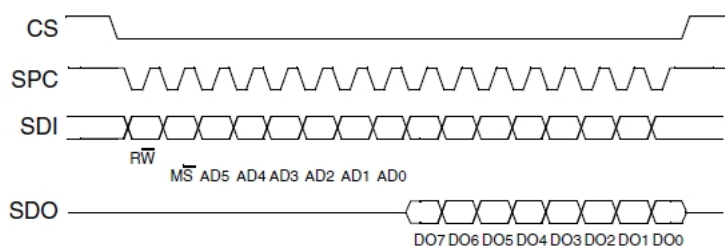
Další možností je rozlišovat, zda číslo je větší nebo menší než osm. Z našeho pojetí příkladu se jedná o přetečení do znaménkového řádu. Pokud je hodnota čísla větší, můžeme říci, že je na záporné straně číselné osy.

Akcelerometr nabízí různě rychlé vzorkování probíhajícího zrychlení. V režimu běžného provozu nabízí konkrétně 50, 100, 400 a 1000 vzorků za sekundu. Akcelerometr nabízí další možnosti nastavení, nicméně tyto funkce nemají v aplikaci opodstatnění.

## Komunikace

Jak již bylo psáno, s obvody v tomto zařízení se výhradně komunikuje pomocí SPI sběrnice. Zařízení na straně akcelerometru komunikuje v šestnáctibitovém modu. Zpráva odeslaná ze strany mikrokontroléru se skládá ze dvou částí. První díl, tj. prvních 8 bitů, označuje adresu registru, se kterým chceme komunikovat. Konkrétní adresa je dána bity 5. až 0. řádem (značeny AD). Řád 6. (bit  $M\bar{S}$ ) označuje periodické vyčítání s inkrementací adresy a řád 7. (R/W) označuje, zda se jedná o zápis nebo čtení. Druhý díl, tj. zbylých 8 bitů, jsou data určená pro adresovaný registr. Vcelku je možné komunikovat se zařízením čtyřmi způsoby. Bit  $M\bar{S}$  oznamuje čtení nebo zapisování v režimu, kdy po odeslání nebo přijmutí 8 bitů inkrementuje adresu vnitřních registrů. Takto činí pro každý následující byte. Tento způsob komunikace má výhodu zejména při čtení hodnot zrychlení. Registry s naměřenou hodnotou jsou v paměti řazeny za sebou, tudíž je možné vyčíst 6 byte najednou. V komunikaci s mikrokontroléry Microchip je zapotřebí počítat s tím, že při vysílání 8 bitů mikrokontrolér očekává příjem dat. Pokud zařízení nic nevysílá, ponechá vodič v nějakém stavu a přijatá data nesou žádnou informaci. Ovšem pokud má mikrokontrolér data pouze přijmout, není toho schopen, protože v režimu, kdy řídí komunikaci, nemá vnějšího činitele, který by ho upozornil na přicházející data. Proto je zapotřebí, nějaká data vysílat, abychom mohli potřebná data přijímat a generovat hodinové pulsy. Je možné využít registru, který je označen WHO\_I\_AM

(dále jen dummy registr). Tento registr se osvědčil při oživování komunikace. Má továrně nastavenou hodnotu na 0x32. Pokud při čtení z tohoto registru dostaneme odpověď právě tuto hodnotu, můžeme říci, že je komunikace funkční. Zároveň máme zajištěné, že jsme neudělali žádné nežádoucí změny v nastavení akcelerometru. Pro ověření zápisu můžeme vyslat příkaz pro nastavení nebo vložení hodnoty do registru a následně vyčíst jeho hodnotu. Tedy v případě čtení dat z registru vyšleme v prvním byte informaci o tom, že budeme vyčítat data, následně, že vyčteme jeden byte. Data přijatá budou obsahovat nesmyslnou hodnotu, proto jejich obsah zahodíme. V dalším byte vyšleme požadavek na čtení z dummy registru. Tímto způsobem jsme zajistili vysílání hodinových pulsů a data přijatá obsahují informace, o které jsme zažádali v prvním byte. V případě dalšího čtení bychom při vysílání prvního byte obdrželi obsah dummy registru, který můžeme opět zahodit. Tedy příjem dat je posunutý o jeden byte od dat vyslaných. Celý proces komunikace je ovšem nutné zahájit změnou stavu na vodiči CS do logické 0. Tím se inicializuje komunikace na straně akcelerometru. Zároveň se smaže i výše zmíněný požadavek na dummy registr, který byl zadán, abychom vyčetli obsah registru.



Obrázek 9: Příklad SPI komunikace v režimu čtení. První byte odešle informace o režimu čtení a adrese registru. Druhý byte je odpovědí zařízení na dotaz. Mikrokontrolér odesílá v druhém byte dotaz na dummy registr. Převzato z [6]

V případě souvislého vyčítání je zapotřebí také vysílat nějaká data, abychom mohli požadovaná přijímat. Jakmile akcelerometr registruje bit  $M\bar{S}$  v logické 1, bude inkrementovat adresu registru. Znamená to, že po prvním přijatém byte bude následující data ignorovat. Pro nás to znamená, že budeme cyklicky odesílat adresu dummy registru. V případě, že by akcelerometr reflektoval námi odesílaná data, dostali bychom po druhém byte vždy stejnou odpověď, a to 0x32. Tento způsob komunikace lze ověřit také zápisem do po sobě jdoucích registrů a ty následně za sebou vyčíst. Registry pro nastavení se také nacházejí v paměti akcelerometru za sebou. Je tedy možné provést nastavení odesláním několika byte v souvislém zápisu. Pro tuto aplikaci jsem zvolil následující nastavení:

- Normal mode, rychlost dat 50 Hz, zapnuté osy: X, Y, Z,
- filtr dat vypnutý, bypass HP a LP filtru,
- přerušení vypnuté,
- Little endian,  $\pm 8g$ , self-test vypnutý, SPI komunikace 4 vodičová,
- režim spánku vypnutý.

Ve výše psaném seznamu je několik položek, které jsem nezmínil. Akcelerometr nabízí možnost aplikace filtru s mnoha nastaveními. V této úloze potřebujeme data získat absolutně nezpracovaná. Filtr akcelerometru nabízí filtrovat data na velmi nízkých kmitočtech, které by se mohly zdát jako nežádoucí, ovšem tyto frekvence sledujeme v měření. Možnost přerušení zahrnuje použití dalších vodičů, které jsou nejen překážkou mechanickou, ale není jej zapotřebí, protože data vyčítáme periodicky a ne jako následek nějaké události. Zařízení je vybavené self-testem, který spočívá v přivedení definovaného napájecího napětí, jež zapříčiní vychýlení do předem definované polohy. To odpovídá určité hodnotě zrychlení. Pokud jsme schopni vyčíst adekvátní hodnotu, můžeme považovat mechanismus za funkční, dle provedeného testu. V případě mechanického poškození by vychýlení bylo nemožné a odečtená hodnota by byla neodpovídající.

#### 6.1.4 Popis funkce jednotky

Modul po svém zapnutí provede inicializaci potřebných obvodů. Jedná se o nastavení periferií mikrokontroléru, který nakonfiguruje vlastní oscilátor, SPI sběrnici a definuje vstupní a výstupní piny. Následuje nastavení akcelerometru a RF modulu přes SPI sběrnici. Nyní se modul nachází ve výchozím stavu, kdy je RF jednotka nastavená do režimu příjmu. Očekává se příjem inicializačního paketu. Po jeho příjmu je hand modul ubezpečen, že je na bezdrátovém spojení přítomen i počítačový modul. Pokud by modul přijal jiná data, program neopustí výchozí stav a bude dál čekat na příjem požadovaného paketu. Po příjmu požadovaných dat se může RF modul přepnout do režimu vysílání a následuje výčet dat z akcelerometru. Hodnoty zrychlení se stanou součástí datového paketu. Režim, ve kterém se nachází modul, se nazývá pomalý. Tento způsob fungování jednotky jsem zavedl při jejím odlaďování. Po odeslání změřených dat se přepne RF obvod opět do režimu příjmu a čeká na potvrzovací paket. Ten povoluje další výčet dat z akcelerometru. Cyklicky se opakuje operace výčtu dat z akcelerometru, vyslání změřené hodnoty a čekání na příjem paketu. Tento

režim opustí zařízení pouze v případě vypnutí, resetu nebo příjmu paketu povolujícího rychlý režim výčtu. Pomalý režim zároveň šetří spotřebu, protože po dobu čekání se vypnou periferie RF obvodu. Vzhledem k tomu, že není nutné odesílat velké množství dat, je časová rezerva na opětovný start RF obvodu. V tomto režimu nedochází k měření ani k záznamu dat do souboru. Přenesené hodnoty zrychlení jsou vypisované do polí v počítačovém programu k příslušným osám. Vypsání hodnoty slouží pouze pro ilustraci aktuální konfigurace zařízení.

Přijme-li ruční modul paket požadující rychlý výčet, přepne se ihned jednotka do tohoto režimu. Mikrokontrolér vyčte status registr akcelerometru. Z jeho obsahu bude testovat bit, který oznamuje nově změřené hodnoty zrychlení. V případě, že jsou data k dispozici, dojde k výčtu příslušného paměťového prostoru akcelerometru. Následuje sestavení datového paketu a jeho odeslání. Po této operaci dojde k opětovnému výčtu status registru akcelerometru. Tyto dvě operace nyní probíhají cyklicky. Po uplynutí 50 cyklů se RF obvod přepne do přijímacího režimu a očekává datový paket. Ten může obsahovat příkaz, který přepne modul zpět do režimu pomalého vyčítání, nebo zprávu potvrzující setrvání v rychlém výčtu.

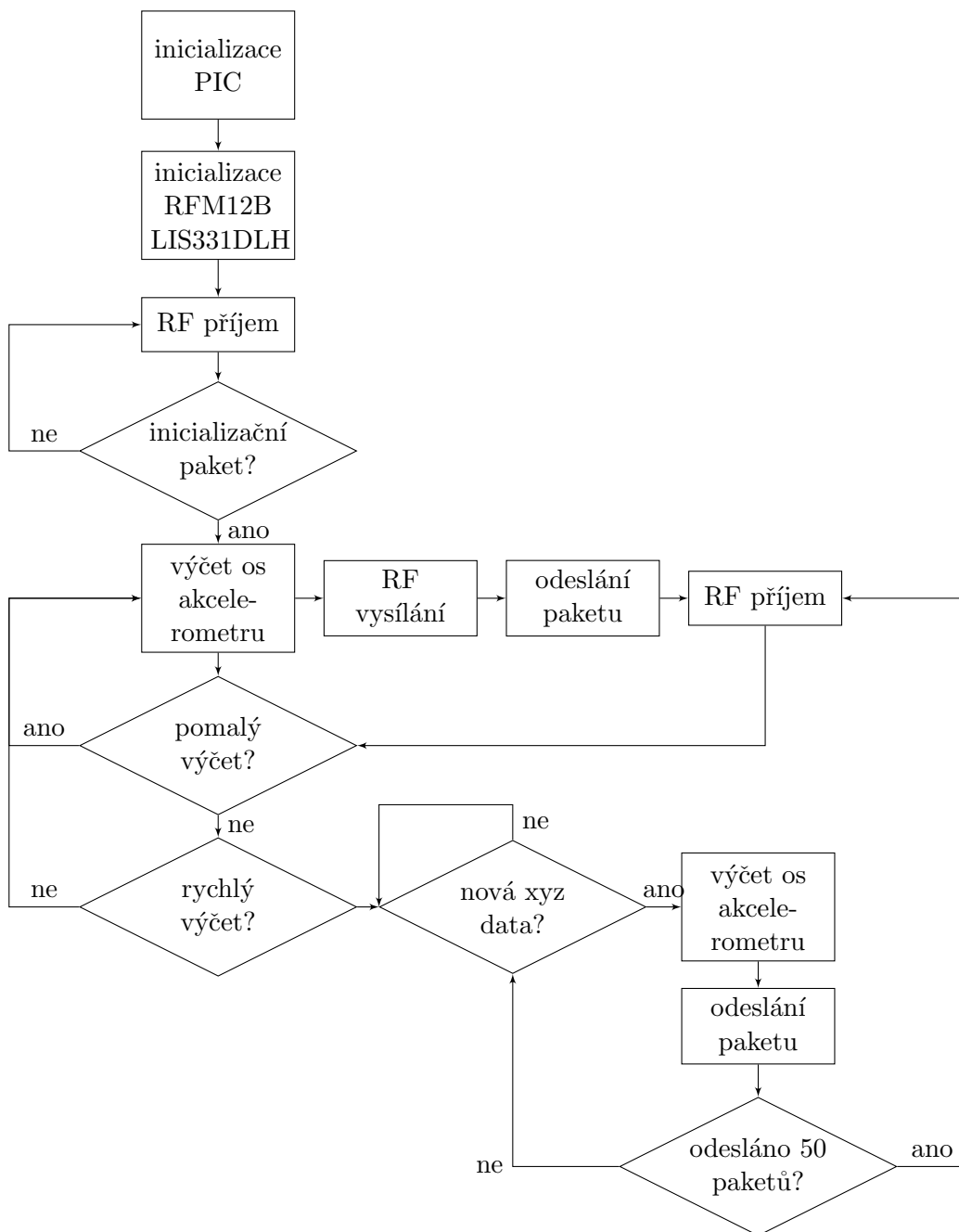
Může se stát, že vlivem rušení nebude doručen datový paket žádající o další data. V případě, že nedojde k včasné odezvě na žádost, bude vyslaná žádost znovu. V momentě odeslání žádosti se spustí vnitřní časovač, který je nastaven na adekvátní dobu, kterou potřebuje měřicí zařízení k odezvě. V případě několika po sobě následujících nedoručených výzev bude žádost cyklicky vysílána. V režimu pomalého vyčítání nejde o žádnou zásadní ztrátu dat. Režim rychlého vyčítání potřebuje přesné a včasné dodání. Aby se zamezilo plýtváním přenosových možností RF obvodu, obsahují data vyslaná směrem k měřicím modulům dva byte. Ochrana dat ze strany měřicího zařízení před jejich poškozením nebo při ztrátě řetězce je dána konstrukcí paketu. Tuto problematiku vystihuje následující kapitola.

### 6.1.5 Datový paket

Strukturu datového paketu popisuje následující tabulka. Z počtu dolních řádků tabulky je patrné, že přenesených byte je celkem jedenáct.

zařízení	paket	data XYZ os						crc součet		•
hand/noise	pořadové č.	X low	X high	Y low	Y high	Z low	Z high	CRC	CRC	end

Tabulka 5: Struktura datového paketu



Obrázek 10: Struktura programu měřicího modulu

První byte identifikuje zařízení, zda data pocházejí od ručního modulu nebo od šumového. Součástí je i informace, zda zařízení pracuje v režimu pomalého nebo rychlého výčtu. PC modul má zaručenou zpětnou vazbu o režimu, ve kterém bezdrátové moduly pracují.

Druhý byte nese pořadové číslo datového paketu. Slouží ke kontrole počtu vyslaných a přijatých byte.

Třetí až osmý byte nese informaci získanou z akcelerometru. Pořadí vyčtených byte i jejich obsah zůstává nezměněn až do počítačového programu, který data zpracuje. Moduly zajišťují pouze správné a včasné předání získaných hodnot zrychlení.

### **6.1.6 Schématický návrh**

Návrh tištěného spoje pro prototypovou jednotku byl větší než finální výrobek. Před naprogramováním mikrokontroléru nebylo zcela jasné, zda některé vývody, např. RF modulu zůstanou nepoužité. Proto jsem vytvořil kombinace propojek, které umožňovaly různé varianty propojení kontaktů RF obvodu a pinů mikrokontroléru. Tištěný spoj je také opatřený kontakty pro připojení sond logického analyzátoru. Layout finálního hand modulu je zobrazen v příloze A.

### **6.1.7 Prototyp modulu**

Měřicí modul je pro koncového uživatele uzavřené zařízení a nemá možnost zpětné vazby o jeho stavu a funkci. K dispozici jsou dvě informační LED diody, zelená a žlutá. Po zapnutí se zařízení nastaví do výchozího stavu, který signalizuje kontinuálně svítící oranžová LED. Zařízení je připravené a čeká na inicializaci od PC modulu. Po obdržení patřičného paketu začne vysílat data v časových intervalech. Každé vyslání je uživateli oznámeno krátkým rozsvícením zelené LED. Pro rychlý režim výčtu svítí zelená LED neustále. Použité diody jsou vysokosvítivé, aby při malém proudu byla intenzita záření dostatečná. V případě, že se vyskytne chyba zařízení, rozsvítí se opět oranžová LED.

## **6.2 Šumový modul**

Otřesový modul nemá prakticky žádné odlišnosti od ručního modulu. Jediným rozdílem je, že umístění akcelerometru je v jeho blízkosti nebo přímo na konektorech bez použití drátového kabelového vodiče. Z hlediska komunikačního pořadí se nachází na nižší úrovni, než je ruční modul. Obsah jeho dat je také důležitý, ale je vysílán vždy po odeslání paketu ručním modulem.



Jediná odlišnost se vyskytuje na tištěném spoji. Prototypová verze modulu je umístěna na velké ploše, aby bylo možné připevnit spoj v blízkosti zdroje nechtěných záření. Velké plochy mohou posloužit jako prostor pro montáž. Finální tištěný spoj je pak možné vybavit obdobou plochou, do které bude vyvrtána díra většího průměru, např. pro šroub.

## 6.3 Počítačový modul

### 6.3.1 Návaznost na původní zařízení

Původní zařízení obsahovalo funkční USB komunikaci. Nebyl důvod od tohoto způsobu spojení počítače a modulu upustit. Společnost Microchip nabízí plnou podporu pro vývoj aplikace spojené s USB rozhraním, mezi které patří ovladače nebo vzorové příklady komunikace. Protože mikrokontrolér PIC18F4550 patří ke starším modelům, vzorové příklady jsou spojené se staršími kompilátory, které vyžadují částečně odlišnou syntaxi kódu. Vzorový příklad, ze kterého jsem vycházel při vytvoření programu, byl původně vytvořen jako univerzální pro několik druhů mikrokontrolérů včetně PIC18F4550 v použití vývojovým kitem. V rámci programového prostředí to znamená nejen množství přidružených hlavičkových souborů, které obsahují informace o vývodech jednotlivých mikrokontrolérů, ale i mnoho maker, které podle zadaných proměnných dynamicky modifikovaly prostředí se zdrojovým kódem. Bylo zapotřebí zbavit pracovní prostředí této možnosti program modifikovat a uzpůsobit ho pro jediný mikrokontrolér.

Společný základ minulé i nově vzniklé verze zařízení spočívá především v rutinách, které obsluhují USB komunikaci. Tyto činnosti běžící v podstatě na pozadí jsou součástí vzorového programu. Jedná se zejména o soubor od společnosti Microchip s programem, který při připojení USB inicializuje komunikaci a zabezpečuje její průběh nebo přechody do definovaných stavů a činností. K tomu patří i implementace přerušení programu, která zajišťuje pravidelnou komunikaci s řídicí jednotkou (host controller).

Z hardwarového hlediska došlo jenom k několika změnám. Zařízení je, stejně jako předchozí verze, napájené z USB. Podle specifikace USB maximální dodaný proud do jednotky 100mA, přičemž nejvyšší počet připojených jednotek je pět. Napájecí možnosti jsou více než dostačující. Místo přímo připojeného akcelerometru je RF obvod. Podle pracovních specifikací podle [7] je zapotřebí zajistit nižší napájecí napětí, než které poskytuje USB. To zajistí stabilizátor napětí TS1117B. Zachoval jsem použití napěťových děličů, které snižují hodnotu logické jedničky na takovou úroveň, aby nebyla vyšší než napájecí napětí a zároveň nižší než požadovaná hodnota pro její správné vyhodnocení.

### 6.3.2 Popis USB rozhraní

USB neboli univerzální sériová sběrnice patří mezi moderní způsoby komunikace. Je definovaná neziskovou organizací USB-IF [13], která je sdružením několika firem. Tato organizace specifikuje USB na všech možných úrovních a vydává dokumentaci, která je dostupná na webových stránkách společnosti.

Součástí specifikace je i hardwarové propojení jednotlivých zařízení, které se neomezuje jen na elektrické definice, ale i mechanická propojení konektorů. S tím souvisí počet vodičů, kterých je celkem 5. Jsou to dva vodiče pro napájecí napětí, dva datové vodiče a stínění. Datové vodiče jsou uloženy v kabelu jako kroucená dvojlinka a tvoří diferenční pár.

Z definice rozhraní plyne, že sběrniceový systém komunikace vyžaduje adresování jednotlivých připojených zařízení. Stejně jako v SPI existuje řídicí jednotka, která se nazývá host nebo host controller. Ta komunikuje s připojenými zařízeními (device). Každé zařízení, které se připojí, má výchozí stav, který mají všechna zařízení společný. Výchozím stavem se myslí sjednocený způsob komunikace a předem definovanou adresu. Následující inicializace zařízení se odvíjí od toho, jak je připojené zařízení klasifikováno. Existuje několik tříd, které rozlišují zařízení podle použití. Jednou z nich je i třída HID, neboli Human Interface Device, do které patří periferie počítače (myš, klávesnice, tablet apod.). Tato třída, jako každá jiná, má svá specifika. Jedním z nich je absence potřeby ovladače, protože ty jsou součástí operačního systému. Univerzálnost USB spočívá v tom, že ovladač se používá v případě přítomnosti zařízení na sběrnici. Jakmile by bylo zařízení odpojeno, ovladač není dále používán.

USB protokol používá čtyři druhy paketů. Takzvaný *token* paket, který informuje o tom, zda chce host číst data, zapisovat nebo začít kontrolní komunikaci. Dalším druhem je *datový* paket, který přenáší libovolnou informaci a je omezen svou velikostí podle rychlosti připojení. *Handshake* paket dává potvrzující informaci o posílané zprávě. Informuje, že zpráva byla přijata v pořádku, nebo že zařízení nemůže zprávu přijmout nebo odeslat. Posledním druhem je SOF (Start of Frame) paket, který je vysílán každou  $1\text{ ms} \pm 500\text{ ns}$ . Každý z těchto paketů je přenášen v datovém rámci, který se skládá z několika bloků. Přenášený paket však nemusí obsahovat všechny tyto bloky, musí ale obsahovat ty základní. Záleží na tom, jakou má datový paket funkci.

Datový rámec začíná *SYNC* blokem, který obsahuje 8 nebo 32 bitů podle rychlosti komunikace. Slouží k synchronizaci hodin obou zařízení. Blok *PID* (*packet id*) se skládá z osmi bitů, z nichž druhé čtyři bity jsou komplementem první čtyř bitů. Tento blok informuje, o jaký druh paketu se jedná. Následuje *ADDR* blok, který nese informaci o adrese zařízení, kterému je

zpráva určená. Zpráva pokračuje blokem, který je označen *ENDP* neboli endpoint. Tato informace slouží výhradně obvodům zajišťující komunikaci na hardwarové úrovni. Předposledním blokem je *CRC* cyklický součet, který slouží k vyhodnocení poškození dat během přenosu. Datový rámeček je završen blokem *EOP* - end of packet, který oznamuje konec datového rámce.

Zpráva vyslaná nějakému zařízení může mít mnoho určení. Jde zejména o data, zprávy zjišťující stav zařízení, potvrzení příjmu zprávy apod. Každá zpráva pak vyvolá akci v zařízení, které u mikrokontroléru odpovídá přerušení. Dalo by se říci, že zprávy při příchodu procházejí tříděním a podle svého určení jsou uloženy do tzv. endpointu. To je místo v paměti, resp. jedná se o buffer. Existuje maximálně 16 endpointů, z nichž každý má výstupní a vstupní buffer označený IN a OUT. Jak již bylo výše psáno, je komunikace na USB sběrnici řízena host controllerem a připojená zařízení nemohou libovolně začít vysílat na sběrnici. Pokud potřebuje nějaká jednotka odeslat data, musí být k tomu vyzvaná. To znamená, že musí uložit data do výstupního bufferu nějakého endpointu. Jakmile host controller odešle zprávu určenou pro nějaký endpoint, dojde výměně dat mezi IN a OUT bufferem daného endpointu.

Endpointy jsou členěny do čtyř skupin a od toho se odvíjejí jejich vlastnosti. Aby byla tato problematika přehlednější, můžeme říci, že dochází ke komunikaci mezi host controllerem a jednotlivými endpointy. Takové komunikační propojení se nazývá *pipe*. Existují tedy čtyři skupiny přenosů. Prvním z nich je *kontrolní* přenos. Slouží k zjišťování statusu zařízení nebo k vysílání příkazů. Jedná se o většinou nahodilá vysílání, které vyvolá host. Je kladen důraz na včasné doručení dat. *Přerušovací* přenosy jsou například pro HID zařízení nebo pro použití mikrokontroléru. Jejich vysílání je nepravidelné. Zařízení musí počkat, než host obslouží zařízení a vyzve ho k vyslání dat. Zároveň je zaručená nízká latence spojení a v případě detekce chyby je vyvolán v další relaci pokus o znovu vyslání dat. *Isochronní* vysílání je kontinuální a periodické. Používají ho zařízení, mezi které patří např. audio nebo video zařízení. Je garantován přístup k širokému přenosovému pásmu USB s omezenou latencí přenosu. Ten je obvykle jednosměrný. Během přenosu dochází k detekci chyb, ale neprobíhá opětovné vyslání v případě selhání. *Bulk* neboli objemové přenosy jsou určeny pro velké množství dat, které se nepravidelně objevují. Příkladem mohou být data ze scanneru nebo pro tiskárnu. Součástí mechanismu je kontrola chyb přenosu, v případě selhání jsou data znovu odeslána. Klade se důraz na doručení zpráv bez chyb. V případě, že sběrnice je vytížena jiným přednostním přenosem, např. isochronním, jsou data vysílána pomaleji, přesto se zárukou bezchybného doručení. S tím souvisí, že není zaručená nízká latence ani šířka přenosového pásma sběrnice.

Jak již bylo výše popsáno, zařízení, které se připojilo ke sběrnici, se nachází v předem definovaném výchozím stavu. Jakmile host zjistí přítomnost zařízení, potřebuje k jeho správné funkci zjistit některé informace. Soubor těchto informací se nazývá *deskriptory* a týká se nastavení výše zmíněných komunikačních požadavků. Existuje několik skupin deskriptorů, z nichž každé zařízení může mít pouze jeden. Protože USB nabízí velkou variabilitu konfigurací, může mít jedno zařízení několik nastavení. V jeden okamžik může být použito právě jedno nastavení, které odpovídá jednomu vybranému deskriptoru v každé skupině. Součástí deskriptorů je informace o výrobci a zařízení, které je označené jako VendorID a ProductID. Patří sem i klasifikace zařízení, v tomto případě HID. Veškeré tyto informace jsou součástí souboru, který vytváří deskriptory. Je tedy možné změnit tyto hodnoty.

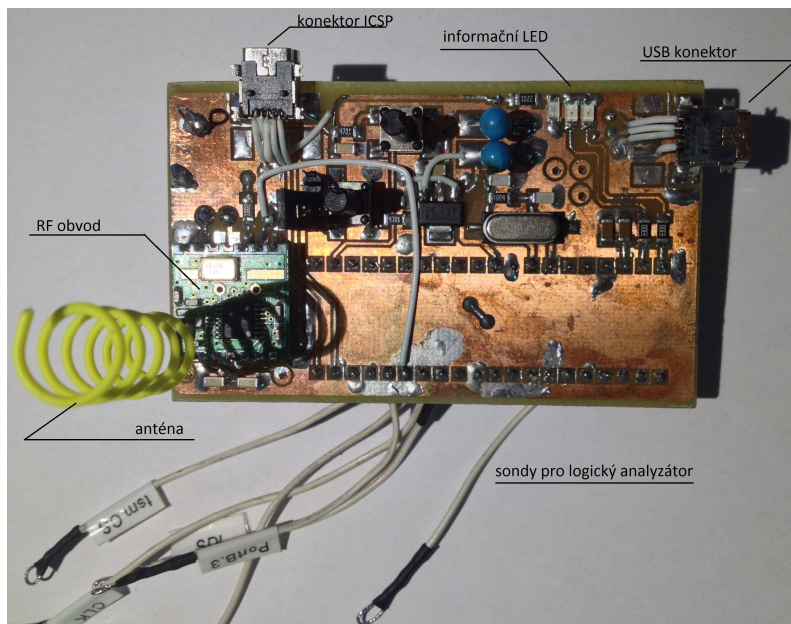
### **USB komunikace**

Ze vzorové aplikace, která je dostupná na webových stránkách společnosti Microchip, jsem odstranil veškerá makra, která modifikují program, pro jiné řady mikrokontrolérů. K pracovnímu prostředí náleží soubor, jehož funkcí je obsluha USB komunikace. Zajišťuje inicializaci zařízení a pravidelné odesílání paketů, které oznamují přetrvávající přítomnost zařízení na sběrnici. K tomu slouží pravidelně se opakující přerušení, které je obslouženo s nejvyšší prioritou. V případě, že je USB zařízení připojené a nakonfigurované, povolí program vstup do funkce, kde probíhá hlavní část programu. Pokud by došlo k odpojení USB, je zamezen přístup do funkce. Zde je také testován příznak oznamující příjem dat přes sběrnici. Přijátá data jsou uložena do 64 bytového pole (RxBuffer). Pro odeslání dat je zapotřebí nejprve zaplnit pole k tomu určené (TxBuffer) a následně zavolat funkci, která zajistí odeslání. Maximální počet odeslaných byte je 64.

### **6.3.3 Prototyp modulu**

Modul funguje jako prostředník komunikace mezi počítačem a měřicími jednotkami. Po připojení by měl spolu se stavovým oknem programu informovat uživatele o své konfiguraci. K tomu slouží LED diody na tištěném spoji. Vývojová verze zařízení obsahuje celkem tři diody. Zelená dioda je napájena z napájecího napětí USB a informuje uživatele o funkčním portu počítače. Dvě další oranžové diody vyjadřují stav připojení modulů. Každému modulu připadá jedna LED dioda. Po připojení do počítače informují uživatele svým rozsvícením, že zařízení není inicializované a není oživena komunikace mezi měřicími jednotkami. Po úspěšném ustanovení komunikačního kanálu zůstanou diody zhasnuté až do okamžiku, kdy dojde ke ztrátě komunikace s jedním nebo druhým modulem. Finální verze zařízení bude opatřena

další informační diodou, která může signalizovat dodatečně přidané funkce.



Obrázek 11: Fotografie vývojového PC modulu

Na obrázku 11 je fotografie prototypu PC modulu. Ten byl vybaven sondami pro logický analyzátor. Upevnění sond na vodiče tištěného spoje způsobilo jejich poškození, proto jsou připojené přímo na nožičky patice pro mikrokontrolér.

## 7 PC program

Počítačový program by měl splňovat některé požadavky, aby usnadnil jeho používání. Podíváme-li se na zařízení, jsou z důvodu např. neopodstatněného nebo nežádoucího chování vybavené pouze resetovacím tlačítkem. Jedná se o uživateli nepřístupný objekt, a proto nemůže přímo ovlivnit jeho chování nebo získat dostatečnou zpětnou vazbu o jeho stavu. Moduly mají několik informačních diod, změnám jejich stavů ale nemůže ošetřující pracovník věnovat velkou pozornost, proto je stěžejním pracovním prostředím počítačový program.

### 7.1 Výchozí aplikace

Pracovní prostředí, které náleží předchozí verzi zařízení, mělo dvě úrovně inicializace. Přesná činnost vnitřních pochodů není známá, ale lze konstatovat, že v první fázi došlo k otevření komunikačního kanálu mezi programem a mikrokontrolérem na modulu. Druhá fáze pak iniciovala komunikaci mezi akcelerometrem a mikrokontrolérem. Zobrazeným prvkem na pracovní ploše je i výběrové okno portu. V momentě, kdy uživatel inicializuje mikrokontrolér, stane se nepřístupným. Slouží k výběru portu USB, na kterém je připojen modul. Dostupné porty nesly označení COM a příslušné číslo. Přímá souvislost se zařízením nebyla vypsána.

Je pravděpodobné, že výčet dat z akcelerometru probíhal od inicializace. Následné spuštění měření zajistilo uložení dat do vytvořeného souboru a spuštění časomíry, jejíž hodnoty se staly také součástí souboru. Přijatá data prošla následnou konverzí. Vždy dvojice byte, příslušící ose, byla odeslána do funkce, která vyhodnocovala znaménko čísla a upravila jej do takového formátu, aby se mohlo stát součástí uložené posloupnosti dat. Kromě spouštěcích prvků na ploše programu se zde vyskytují i oznamovací okna. Ta slouží k informování stavu zařízení, zejména během inicializace. Dále se zde vypisovala přijatá data ve formě ASCII<sup>5</sup> znaků. Výpis změřených hodnot, zobrazených v informačním okně, nemá žádnou vizuální souvislost s naměřenými daty. Jde pouze o počítačovou interpretaci přijatých dat.

### 7.2 Nové pracovní prostředí

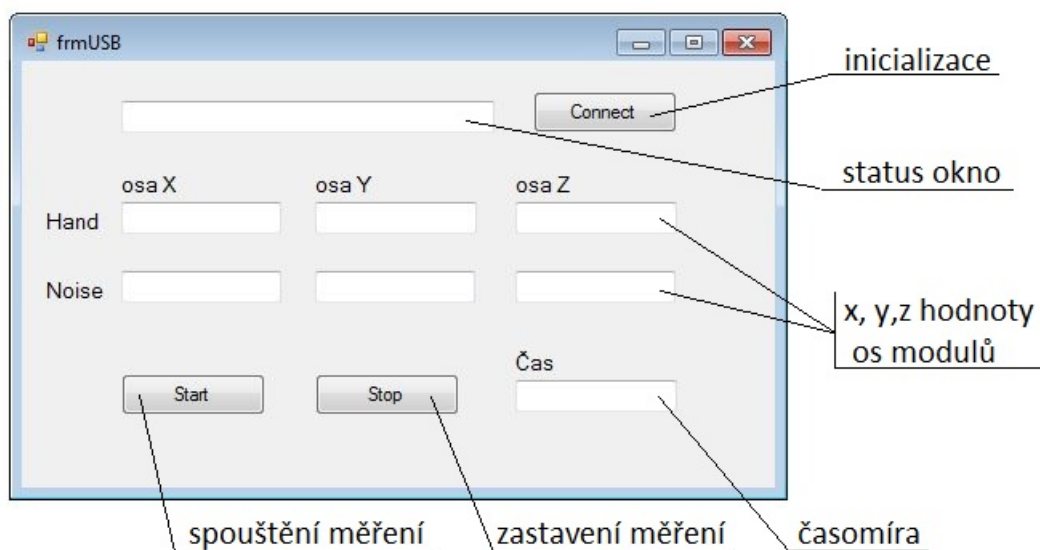
Nové prostředí si zachovalo některé prvky předchozí verze. Na obrázku 12 je vyobrazené programové prostředí nové verze programu. První řádek, nazvaný status okno slouží k informování uživatele o stavech celého zařízení. Uživatel je informován jednoduchými frázemi:

- PC modul,

---

<sup>5</sup>ASCII je zkratka pro American Standard Code for Information Interchange, tedy pro kódovou tabulku definovaných znaků

- zařízení není k dispozici,
- slow mode (pro pomalý výčet),
- fast mode (pro rychlý výčet a měření),
- chyba spojení HAND modulu,
- chyba spojení NOISE modulu,
- chyba komunikace (pro chybu spojení obou modulů).



Obrázek 12: Programové prostředí s popisky prvků

Tlačítko Connect spustí proces inicializace a v případě úspěchu bude vypsána zpráva ve status okně: slow mode. V tomto režimu se zobrazují jednotlivé hodnoty os v patřičných oknech. Pokud uživatel začne měřit stiskem tlačítka Start, status okno vypíše zprávu: fast mode. Proběhne vytvoření souboru, do kterého začnou být ukládány změřené hodnoty zrychlení. V okně časomíry začne běžet čas. Pro ukončení stiskne uživatel tlačítko Stop. To uzavře soubor a uloží jej. Poslední hodnota času zůstane zobrazena. K jejímu smazání dojde při opětovném stisknutí tlačítka Start. Zobrazovaný čas je generovaný objektovým prvkem Timer. Jedná se o časovač u kterého lze nastavit interval mezi generovanými pulsy.

### 7.2.1 Třída HID

Jedním z cílů nové verze zařízení je usnadnit propojení počítače a modulů. To má zajistit třída HID<sup>6</sup>, která ze své definice zahrnuje zařízení sloužící uživateli ovládat počítač. Její vlastností je, že k inicializaci zařízení není nutné použít ovladač.

<sup>6</sup>HID neboli Human Interface Device, třída zařízení připojených přes USB

Snahou bylo vycházet z programovacího prostředí jazyka Visual Basic. Na webové adrese [14] jsem objevil volně dostupnou šablonu vytvořenou v prostředí Visual Basic pro komunikaci s HID zařízeními. Tu jsem implementoval do svého programu. Šablona vyžaduje umístění knihovny mcHID.dll do složky Windows/System32. Pak je program plně funkční. Pro příjem dat přes USB je nutné do proměnných VendorID a ProductID vložit tyto hodnoty zařízení, se kterým chceme komunikovat. Aplikace ve svém základním nastavení je určena pouze pro jedno jediné zařízení. Nicméně mikrokontrolér nabízí v jedné ze svých proměnných nastavit hodnoty pro VendorID a ProduktID. Použil jsem původní nastavení společnosti Microchip, protože další stejné zařízení se do systému nepřipojuje.

Komunikace po sběrnici probíhá velmi jednoduchým způsobem. V případě příchozích dat je automaticky volána funkce z knihovny, která uloží přijatá data do příjmového pole. Ta pak procházejí dalším zpracováním. Pro odeslání dat je zapotřebí naplnit odesílací pole a zavolat knihovní funkci pro odeslání dat.

Pro ověření komunikace jsem použil zkušební verzi monitorovacího programu Device Monitoring Studio, která vypíše všechny přenesené datové rámce přes USB. Pro přehlednost je možné si vybrat konkrétní připojené zařízení.

### **7.2.2 Zpracování dat**

Přijatá data, stejně jako v předchozí verzi zařízení, procházejí funkcí, která upraví tvar rozděleného čísla do dekadické podoby. Až do této funkce přicházejí data z akcelerometru v nezměněné podobě. Některé procedury funkce jsem zachoval, protože triviální nebo jednoznačné, ale spolehlivé úkony je zbytečné měnit. V první fázi se stejným způsobem (uvedeno v kapitole 3.3) pomocí maskování detekuje znaménkový bit. Jeho hodnota je vyjádřena booleovskou proměnnou. Poté dojde ke sloučení dvou byte do pole typu integer. Pokud je číslo kladné, program opustí funkci. Tato podoba čísla vyjadřuje hodnotu zrychlení. Je-li číslo záporné, projde následující úpravou. Aby nedošlo k podtečení a dezinterpretaci dat, vytvořil jsem nové pole, které má hexadecimální hodnotu 0xFFFF. To je nejvyšší možná dosažitelná hodnota dvou byte. Od tohoto pole odečítáme hodnotu pole s naměřenými daty. Převědeme tím záporné číslo na jeho kladný protějšek. Abychom mohli číslo zobrazit jako záporné, odečteme jeho hodnotu od nuly a uložíme jej na stejné místo. Počítač provede výpočet a v registru zobrazí číslo jako 32 bitový integer. Takto zobrazené číslo má svůj správný tvar a znaménko.



## 8 Vzájemná komunikace modulů

Komunikaci mezi funkčními bloky lze rozdělit na dvě části. První částí je komunikace mezi počítačem a PC modulem. Tato komunikace probíhá po USB sběrnici a stěžejní přenos dat se uskutečňuje z PC modulu směrem do programového prostředí počítače. Úlohou programového prostředí počítače je vysílat ovládací příkazy do PC modulu, který ovládá měřicí zařízení a ukládat naměřená data.

Druhá část spočívá v moderování bezdrátové komunikace. Je zapotřebí vytvořit komunikační schéma, které zajistí přístup ke komunikačnímu médiu všem zúčastněným jednotkám. Zároveň nejvyšší prioritou je bezpečné dopravení změřených dat do PC modulu s co nejmenší možnou časovou prodlevou.

### 8.1 Rozhraní počítač a PC modul

Komunikace počítače a modulu po jeho připojení probíhá na inicializační úrovni. Program rozpoznává zařízení podle VendorID a ProductID, které pošle mikrokontrolér jako svou identifikaci. Poté nastává přenosový klid do okamžiku, kdy uživatel spustí proces inicializace. Od této chvíle začnou v pravidelných intervalech přicházet data od měřících jednotek. Data jsou v PC modulu sloučena a odeslána v jednom paketu. Paket jednoho modulu je tvořen 10 byte, celkem je odesláno 20 byte. Při ovládní celého zařízení z programového prostředí odesílá počítač vždy jeden předem definovaný byte, jehož hodnotu rozpozná mikrokontrolér.

### 8.2 Bezdrátové komunikační schéma

Vzájemná komunikace mezi třemi zúčastněnými, tj. PC, ruční a šumová jednotka, je řízená PC jednotkou. Po zapnutí ručního a šumového modulu a po jeho k USB sběrnici se nastaví všechna zařízení do výchozího stavu. Výchozím stavem se rozumí takové nastavení, kdy PC modul je připraven k vysílání a měřicí jednotky očekávají příjem dat. Na pokyn počítačového programu je spuštěná inicializace, která spočívá ve vyslání startovacího paketu. Pokud ruční jednotka rozpozná přijatá data, přechází do režimu pomalého výčtu. Prioritu ve vysílání má vždy ruční modul. Po odeslání paketu přechází do příjmací konfigurace a vyčkává na příchod dalšího povolovacího paketu. Šumový modul setrvá po přijmutí inicializačního paketu v režimu příjmu. Vysílání šumového modulu spouští vyslaná data od ručního modulu. Dalo by se říci, že ruční modul má delegované ovládní nad šumovým modulem. Šumový modul se přepne do vysílacího režimu a odešle svá naměřená data. Ve výsledku je komunikace šumové jednotky v závěsu za ručním modulem. Po odeslání dat přechází stejně jako ruční modul do

režimu příjmu. Sled sekvencí se periodicky opakuje do té doby, než PC modul vyšle paket zahajující rychlý výčet.

Pokud by nebyl doručen povolovací paket ze strany PC modulu a ten nedostane očekávaná data do stanoveného limitu, bude opakovat jeho vysílání. Tato korekce pokrývá chybu při nedoručení povolovacího paketu, nebo při nedoručení dat od ručního modulu. Pokud počet pokusů o navázání překročí limitní úroveň, bude modul prohlášen za nedostupný a počítačový program vypíše chybu spojení. Pokud by došlo ke ztrátě dat při komunikaci se šumovým modulem, začne počítat množství nedoručených paketů. Bude ignorovat, že nedošlo k doručení dat a bude dál pokračovat ve vysílání povolovacích paketů. Jakmile počet dosáhne prahové hodnoty, prohlásí jej za nedostupný a počítačový program vypíše chybu spojení s modulem.

V momentě, kdy uživatel spustí měření, PC modul vyšle paket, který přepne zařízení do rychlého režimu výčtu. Komunikační schéma se liší od výše zmíněného tím, že po odeslání datového paketu měřicí jednotkou nenásleduje přepnutí do režimu příjmu, ale vysílají se data kontinuálně. K přepnutí do režimu příjmu dochází po odeslání padesáti paketů, tedy po jedné vteřině. Měřicí zařízení bude přijímat jen takovou dobu, která je k dispozici mezi jednotlivými výčty z akcelerometru. Při výčtu dat padesátkrát za vteřinu je z 20 ms na příjem vyhrazeno přibližně 10 ms, protože ve zbylém časovém úseku jsou přenášena data do RF obvodu. Po uplynutí limitu přejde měřicí jednotka opět do režimu vysílání.

Přepnutí na příjem slouží k případnému návratu na pomalý režim. Dochází k němu po skončení měřicí relace. Počítačový program má již data uložená v souboru a cílem přechodu je snížit spotřebu modulů a zároveň zachovat komunikaci. Pokud by nebyla data během 10 ms intervalu doručena, musí PC modul počkat další vteřinu a znovu vyslat datový paket.

## 9 Ověření zařízení

### 9.1 Měření gravitačního zrychlení

Aby bylo možné srovnat předchozí a nově vzniklé zařízení, bylo by vhodné použít stejnou měřicí metodu, která je popsána v kapitole 3.2. Měření proběhlo na pracovní ploše, kde vzdálenost bezdrátových modulů byla řádově několik desítek centimetrů. Během výčtu dat byla sledována SPI linka PC modul logickým analyzátozem po dobu deseti sekund. V naměřeném vzorku byla 100% úspěšnost přenosu dat. Pro vyvrácení náhodného jevu bylo zopakováno měření, které ukázalo vždy stejný výsledek při vzdálenostech do pěti metrů na přímou viditelnost.

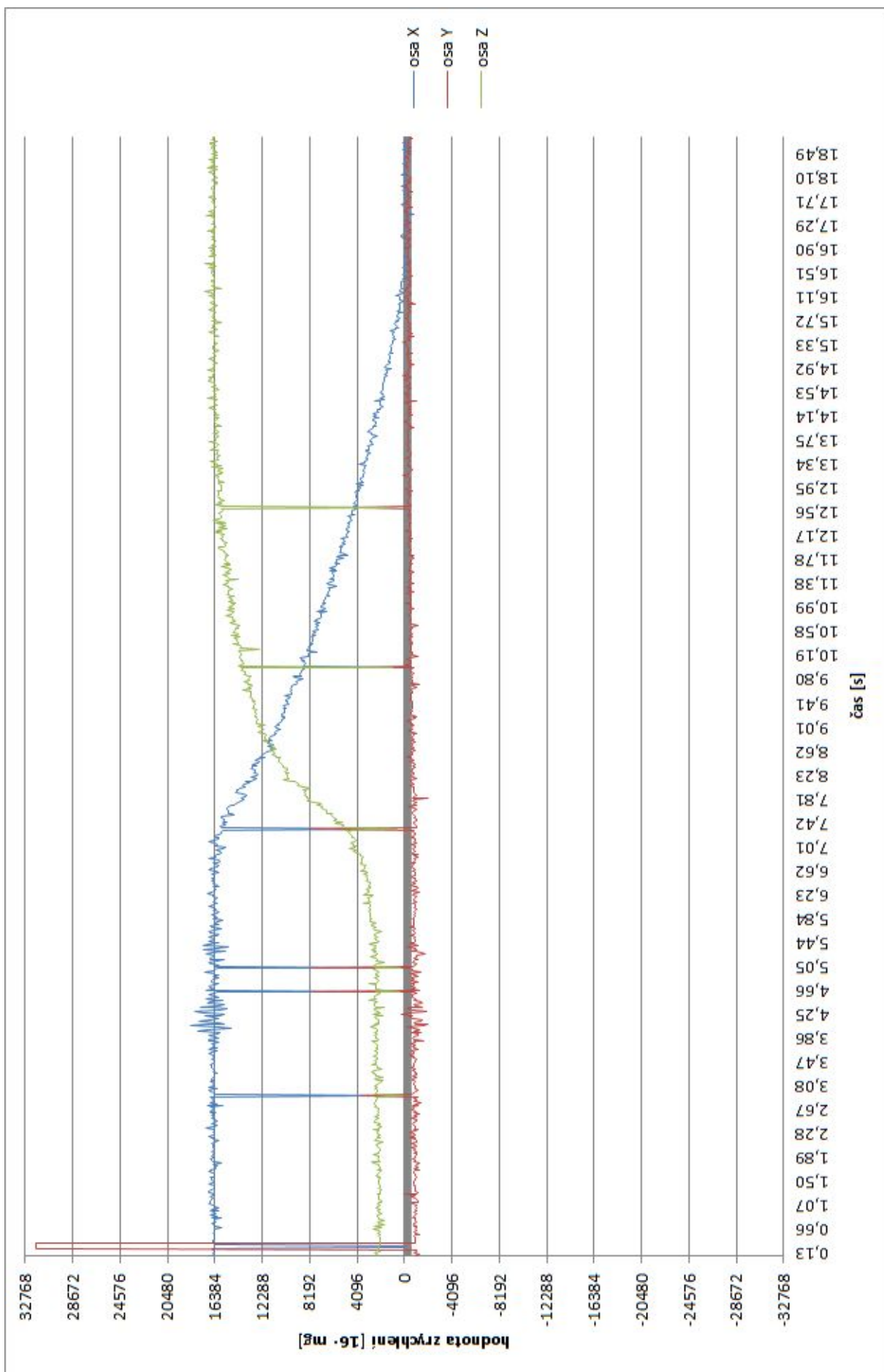
V prvním měření byly vystaveny gravitačnímu zrychlení osy X a Z. Nastavený rozsah byl  $\pm 2g$ . Tato hodnota je optimální pro toto měření, protože změna zrychlení se projeví ve čtvrtině měřicího rozsahu. Na obrázku číslo 13 na následující straně je zobrazen výsledek prvního měření.

Graf názorně ukazuje, že předpokládaný výsledek měření odpovídá skutečnosti. pro lepší zobrazení je svislá stupnice přizpůsobená naměřenému rozsahu. Červeně označená osa Y během měření nevykazuje žádnou činnost a hodnota zrychlení se pohybuje kolem nulové hodnoty. Naproti tomu osa Z je vystavená gravitačnímu zrychlení a změřená hodnota se pohybuje kolem čísla 16000. Podle tabulky 4 platí, že při stejném rozsahu bude hodnota  $1g$ , odpovídající gravitačnímu zrychlení, vyjádřena bitem  $2^{14}$ , který odpovídá dekadickému číslu  $16384$ . Měření tedy souhlasí s předpokládanou teorií. Vlivem natočení pak dochází ke změně působení zrychlení z jedné na druhou osu. Osa Z vykazuje drobnou odchylku na počátku vzorků. To je pravděpodobně způsobené nepřesným umístěním tištěného spoje s akcelerometrem ve svěráku. Drobný spoj je těžké správně uchytit za jeho hrany a zároveň zajistit přesné umístění.

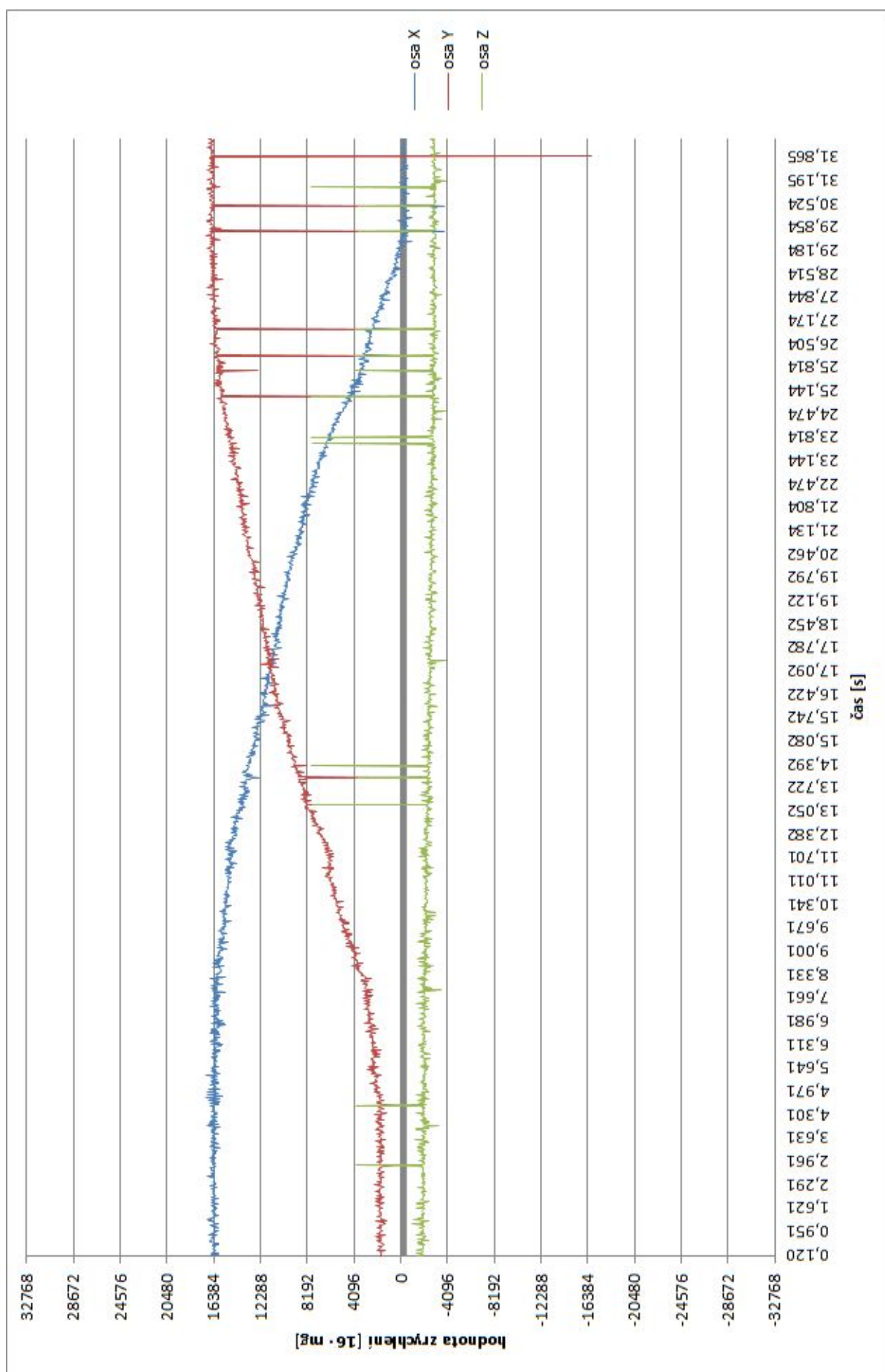
Ve vzorcích zobrazených na grafu je vidět také několik peaků. Ty byly způsobeny nekonstantním otáčením a náhodnými chvilkovým záchvěvy. Ty se projevují ve všech třech osách v jeden okamžik. To naznačuje náhodný směr působení zrychlení. Z hodnot jednotlivých peaků by se dalo usoudit jakým směrem bylo krátkodobé působení síly. Výrazné projevy pak přešly v druhé polovině grafu do osy Z. Záchvěvy tedy působily stejným směrem, ale kvůli natočení akcelerometru se promítly do jiné osy.

Další obrázek zobrazuje měření mezi osami X a Y. Zde se podařilo docílit plynulejšího a delšího pohybu. Rozsah svislé osy je nastaven na celý možný měřicí rozsah akcelerometru.

Opět jsou patrné na grafu drobné odchylky. Osa Z se číselně pohybuje kolem konstantní hodnoty. To může být způsobeno opět nepřesným umístěním akcelerometru ve svěráku. Osa Z by měla během měření směřovat kolmo na směr působení zrychlení. Pokud by byl akcelerometr mírně nakloněný, působení síly by se projevilo i v ose Z.



Obrázek 13: Měření gravitačního zrychlení mezi osami X a Z



Obrázek 14: Měření gravitačního zrychlení mezi osami X a Y

## 10 Možnosti vylepšení

S tím, jak se vyvíjí metodika vyšetření pacientů, je zapotřebí přizpůsobit zařízení novým podmínkám. Některé úpravy je možné provést dodatečně na zařízení, jiné potřebují komplexní zásah. Mnoho možných zlepšení se objeví až při praktickém používání v ordinaci. Některé z nich lze předpokládat, ovšem praxe může ukázat, že by tyto funkce byly zbytečné. V rámci konzultačních sezení, kde jsme se zdravotnickým týmem řešili podobu zařízení, vzniklo několik myšlenek, z nichž některé se uplatnily. Jiné podléhají vývoji metodiky vyšetření pacientů a mohou být zavedeny až později. V této kapitole uvádím seznam možných modifikací zařízení za účelem vylepšení funkčnosti.

- **Tlačítko náhlé události** - Při vyšetření pacienta v ordinaci mohou nastat situace, které ovlivní měření. Např. leknutí pacienta může způsobit otřes, který bude zaznamenán. Zdravotní pracovník má možnost zahodit vzorek dat nebo nějakým způsobem zaznamenat událost při měření. Osoba, která zpracovává data na signálové úrovni nemusí rozpoznat incident v měření a chybu tak přehlédnout. Proto by bylo vhodné mít možnost zaznamenat přímo do ukládaných dat informaci o tom, že v nějakém momentu došlo k nepředvídatelné události. Řešením by bylo vyvést ze zařízení tlačítko, které by ošetřující pracovník v momentě incidentu nebo záhy po něm stiskl a zaznamenal upozornění přímo do dat.
- **Stav baterií** - Mikrokontrolér použitý v měřicích modulech nemá obvody vyhodnocující pokles napájecího napětí. Tuto vlastnost má ale RF modul. Programovatelná prahová hodnota úrovně vstupního napětí vyvolá přerušení, které vyhodnotí mikrokontrolér. Protože není známá spotřeba zařízení při běžném používání, nemůžeme jednoznačně stanovit výdrž baterií. Pokud by měření ukázala, že výdrž baterie není dostačující, bylo by vhodné tuto funkci implementovat. Jednalo by se o zásah pouze na softwareové úrovni.
- **Nastavitelná citlivost z počítačového programu** by byla vhodná, pokud by se ukázalo, že pro různé pacienty je nutné měnit měřicí rozsahy. Při simulovaném třesu ruky nedošlo k dosažení prahové hodnoty rozsahu. Vezmeme-li v úvahu, že hodnota zemského gravitačního zrychlení odpovídá  $9,81[m \cdot s^{-2}]$  tj.  $1g$ , jedná se o velmi vysokou hodnotu zrychlení.

## 11 Závěr

Na začátku práce v kapitole shrnující nové požadavky jsem vyjmenoval body, které bych měl splnit. V závěru práce bych vyhodnotil jednotlivé body ve stejném pořadí, jak jsou uvedeny.

- Předchozí zařízení jsem ověřil a v takové konfiguraci, v jaké jsem ho měl k dispozici ho shledávám nespolehlivým.
- Při vývoji nové verze zařízení jsem narazil na několik nesrovnalostí. Rozdíly byly v uvedených a použitých komponentech (akcelerometr) a ve zpracování přijatých dat, které bylo uzpůsobené na jinou komponentu. Zároveň matematické operace, prováděné při úpravě hodnot, byly nesprávné.
- Vytvořil jsem novou bezdrátovou jednotku, která je schopna vyčítat zrychlení z akcelerometru a bezdrátově komunikovat. Funkčnost jsem ověřil měřením.
- Vytvořil jsem druhou jednotku, která snímá šumové pozadí. Konstrukčně je identická s druhým měřicím modulem.
- Použitý RF modul spolehlivě komunikuje a zajišťuje přenos dat v obou směrech.
- Doposud vytvořené zařízení se stalo základem pro Počítačový modul. Použil jsem i části zdrojového kódu pro počítačovou aplikaci.
- Nové zařízení je klasifikováno jako třída HID. USB komunikace bylo ověřena měřením.
- Koncept počítačového programu jsem z části zachoval. Ponechal jsem malé okno s ovládacími prvky. Zjednodušil jsem proces inicializace pro uživatele. Program disponuje jedním informačním oknem, které informuje o stavu zařízení.
- Z prostředí ovládacího programu jsem odstranil přebytečná okna.

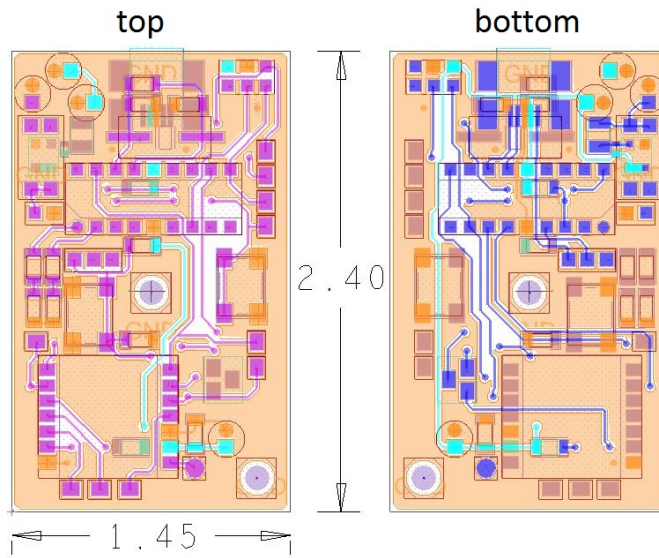


## Reference

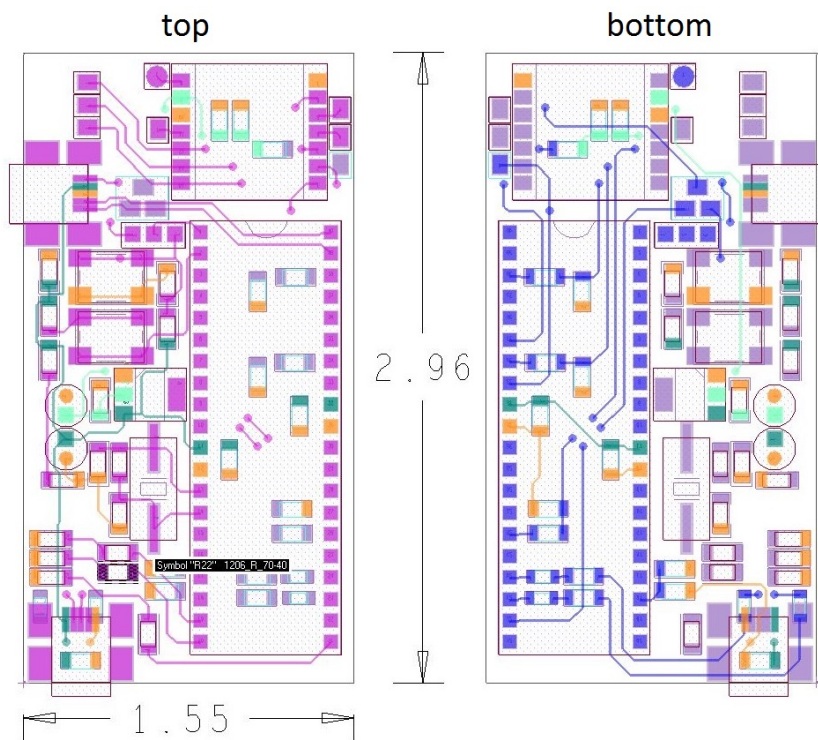
- [1] Petr Novotny. *Stanovení míry tremoru pomocí akcelerometrických senzorů*. ČVUT Fakulta elektrotechnická, 2013.
- [2] G.; et al. Grimaldi. *Tremor From Pathogenesis to Treatment*. Morgan and Claypool, 2008.
- [3] Sonja Markez. *DEVELOPMENT OF A HAND TREMOR QUANTIFICATION DEVICE FOR THE MEASUREMENT OF PATHOLOGICAL TREMOR*. <https://tspace.library.utoronto.ca/bitstream/1807/15144/1/MQ53333.pdf>, 2000.
- [4] Zdeněk Hrdina a František Vejražka. *Signály a Soustavy*. Vydavatelství ČVUT, 1998.
- [5] Miroslav Husák. *Mikrosenzory a mikroaktuátory*. Academia, 2008.
- [6] STMicroelectronics, <http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/datasheet/CD00213470.pdf>. *LIS331DLH*.
- [7] HopeRF electronic, <http://www.hoperf.com/upload/rf/RFM12B.pdf>. *RFM12B*.
- [8] Český telekomunikační úřad. *Část plánu využití rádiového spektra č. PV-P/15/02.2009-4*.
- [9] Microchip Technology, <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/41391D.pdf>. *PIC16(L)F1826/27*.
- [10] ON Semiconductor, <http://www.onsemi.com/pub/Collateral/NCP1400A-D.PDF>. *NCP1400A datasheet*.
- [11] Miroslav Husák. *Návrh napájecích zdrojů pro elektroniku, přednášky*. ČVUT Fakulta elektrotechnická, 2006.
- [12] STMicroelectronics, [http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/application\\_note/CD00215823.pdf](http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/application_note/CD00215823.pdf). *LIS331DLH application note*.
- [13] USB IF. *Universal Serial Bus Specification*. USB IF, [www.usb.org/developers/docs/usb20\\_docs/usb\\_20\\_121314.zip](http://www.usb.org/developers/docs/usb20_docs/usb_20_121314.zip).
- [14] *Šablona USB HID pro Visual Basic*. <http://helmpcb.com/software/usb-hid-template-for-visual-basic-2005>.

- [15] Alexandr krejčířík Miroslav Husák, Lubor Jirásek. Návrh napájecích zdrojů pro elektrotechniku, cvičení. *ČVUT Fakulta elektrotechnická*, 2006.
- [16] Taiwan Semiconductor, [http://www.taiwansemi.com/products/datasheet/TS1117B\\_F14.pdf](http://www.taiwansemi.com/products/datasheet/TS1117B_F14.pdf). *TS1117B datasheet*.
- [17] Microchip Technology, <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39632e.pdf>. *PIC18F2455/2550/4455/4550*.
- [18] HopeRF electronic, [http://www.hoperf.com/upload/rf/RF12B\\_code.pdf](http://www.hoperf.com/upload/rf/RF12B_code.pdf). *RFM12B programming guide*.
- [19] Microchip Technology, <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39700c.pdf>. *Oscillator Guide*.
- [20] K. Řasová. *Fyzioterapie u neurologicky nemocných (se zaměřením na roztroušenou sklerózu mozkomíšní)*. Ceros, Praha, 2007.
- [21] Z. Ambler a kol. *Klinická neurologie. Vyd. 2.* Triton, 2008.

## A Příloha

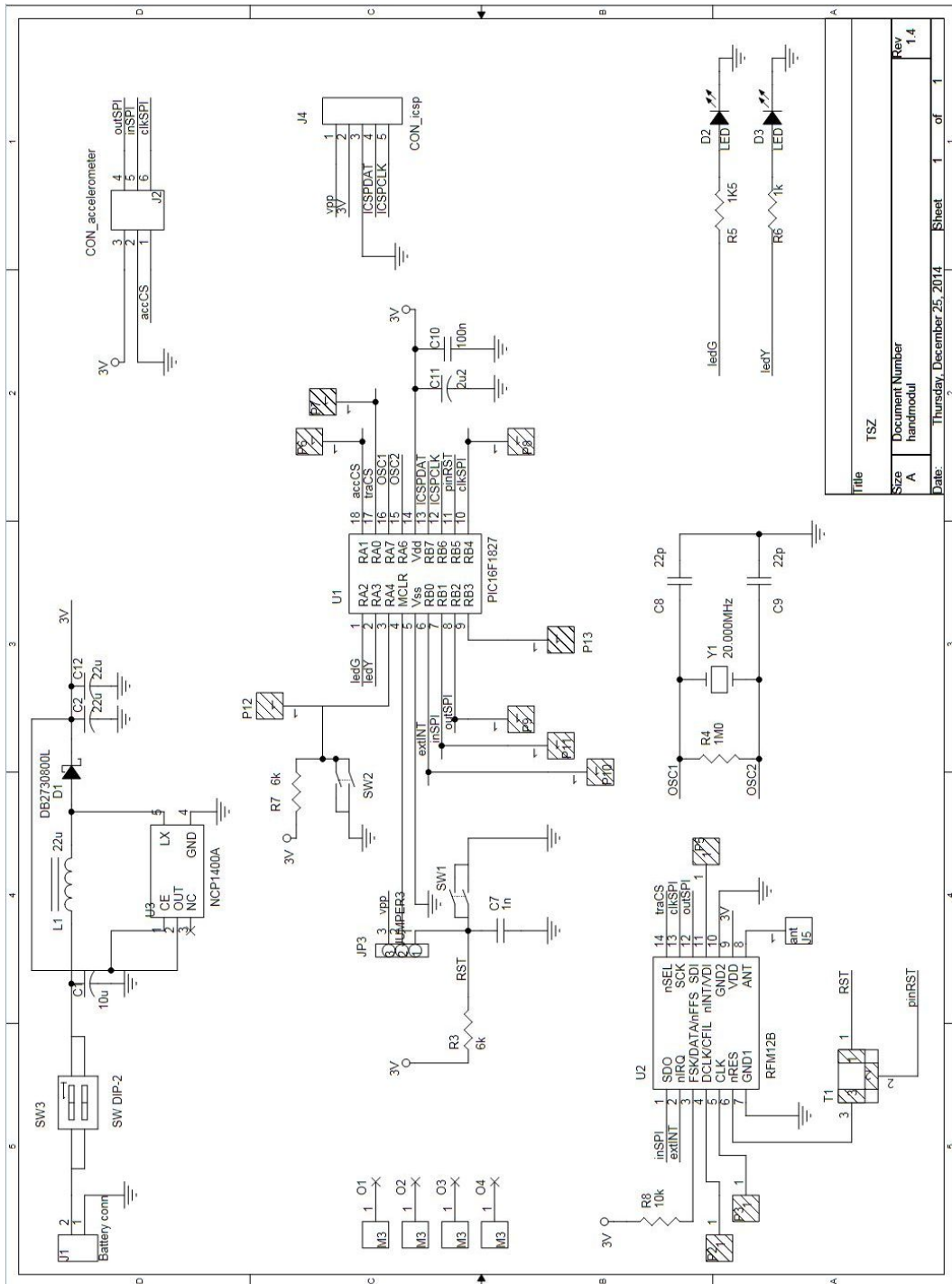


Obrázek 15: Layout Hand modulu, rozměry jsou [inch], návrh nové verze

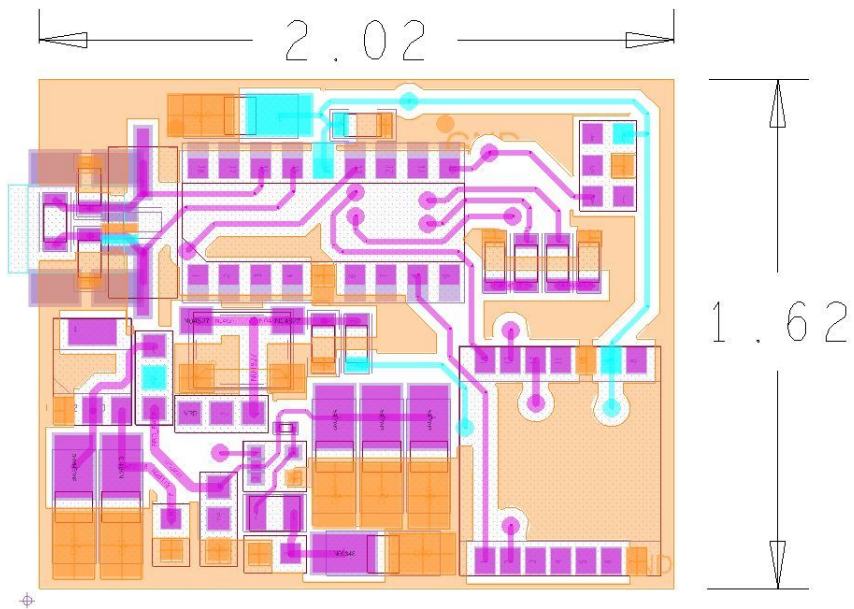


Obrázek 16: Layout PC modulu, rozměry jsou v [inch], návrh nové verze

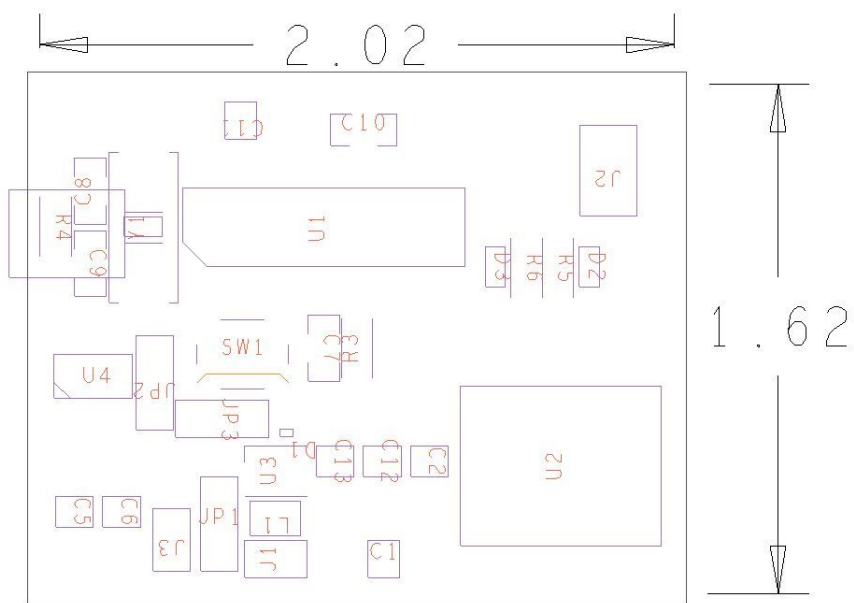
## B Technická dokumentace Hand Modul



Obrázek 17: Schematický návrh ručního modulu



Obrázek 18: Schematický návrh ručního modulu, jednotka rozměru v [inch]

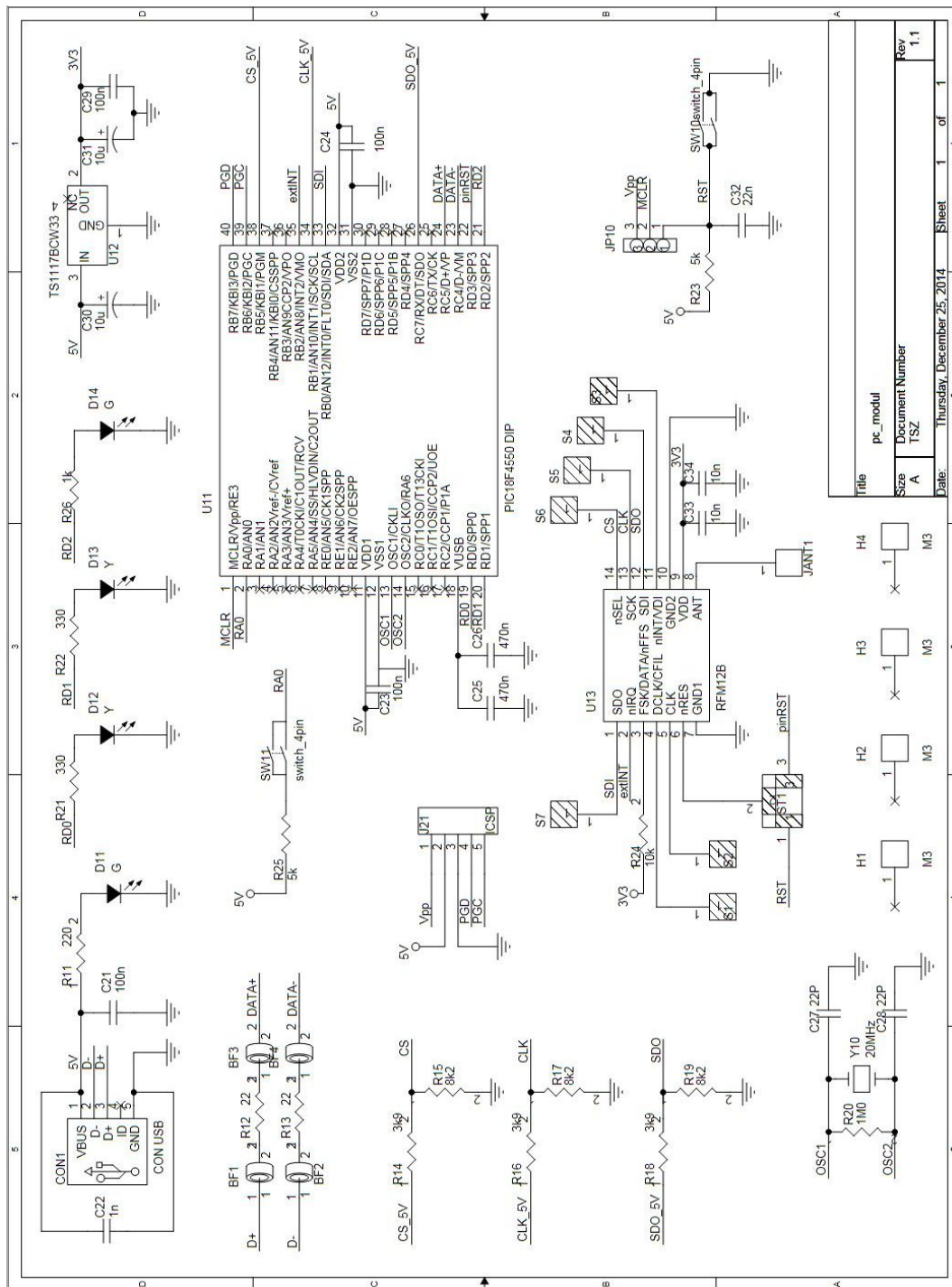


Obrázek 19: Osazovací náčrt ručního modulu, jednotka rozměru v [inch]

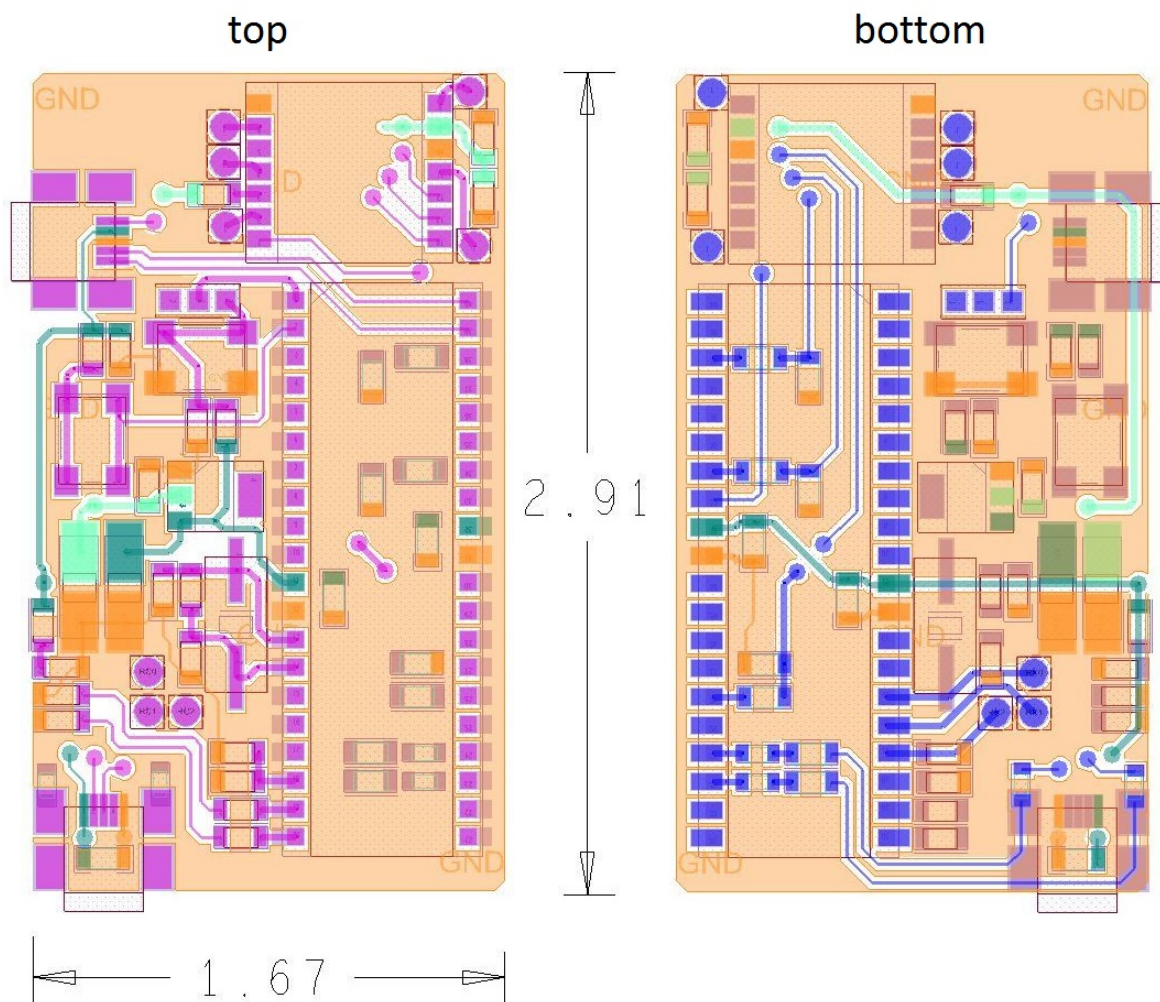
## Seznam použitých součástek

Součástka	Reference	Označení	Hodnota	Jednotka
dioda	D1	DB2730800L		
LED	D2			
LED	D3			
indukčnost	L1		22	nH
kondenzátor	C1		10	uF
kondenzátor	C2		22	uF
kondenzátor	C5		10	uF
kondenzátor	C6		10	uF
kondenzátor	C7		1	nF
kondenzátor	C8		22	pF
kondenzátor	C9		22	pF
kondenzátor	C10		100	pF
kondenzátor	C11		2,2	uF
kondenzátor	C12		22	uF
kondenzátor	C13		22	uF
konektor	J1			
konektor	J2			
konektor	J3			
konektor	J4			
krystal	Y1	20,000		MHz
procesor	U1	PIC16F1827		
rezistor	R3		6	k $\Omega$
	R4		1	M $\Omega$
	R5		1,5	k $\Omega$
	R6		600	$\Omega$
RF obvod	U2	RFM12B		
spínač	SW1			
stabilizátor U	U4	TS1117BCW33		
step-up	U3	NCP1400A		

# C Technická dokumentace PC modul

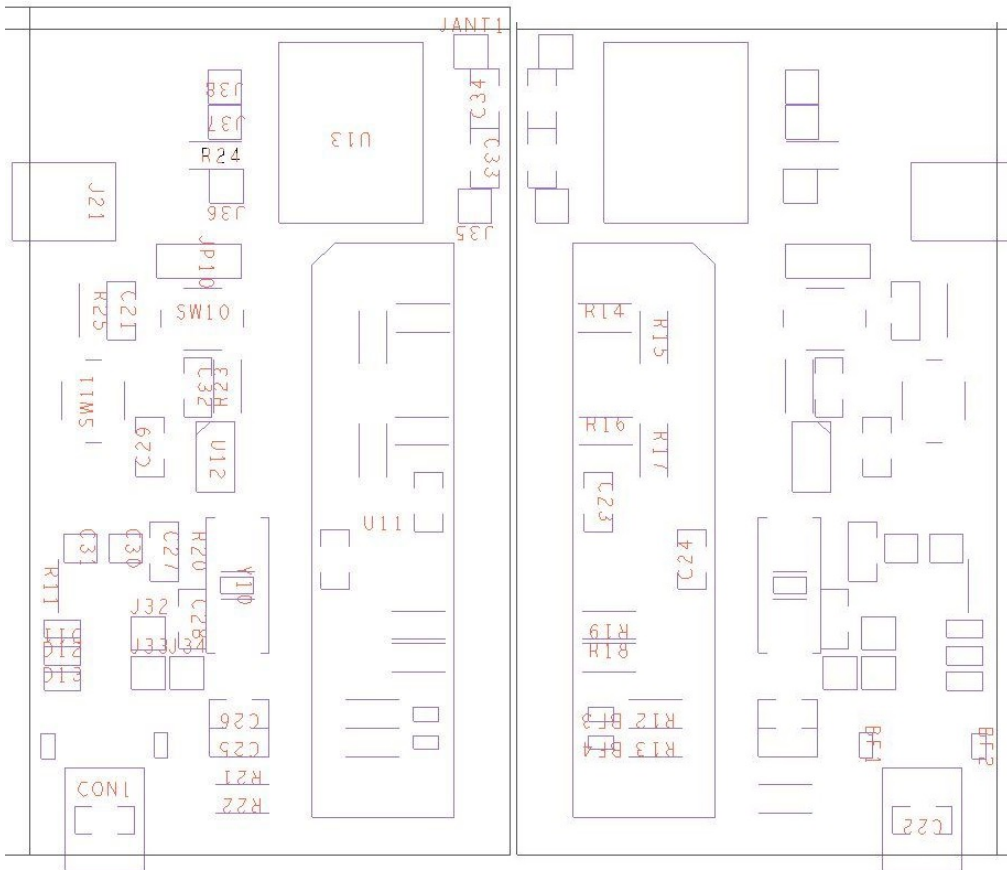


Obrázek 20: Schematický návrh počítačového modulu



Obrázek 21: Návrh tištěného spoje PC modulu, jednotky v [inch]





Obrázek 22: Osazovací schéma PC modulu, vrstvy ve stejném pořadí jako u layout

## Seznam použitých součástek

Součástka	Reference	Označení	Hodnota	Jednotka
ferritová perla	BF1			
ferritová perla	BF2			
ferritová perla	BF3			
ferritová perla	BF4			
kondenzátor	C21		100	nF
	C22		1	
	C23		100	
	C24		100	
	C25		470	
	C26		470	
	C27		22	pF
	C28		22	pF
	C29		100	nF
	C30		10	uF
	C31		10	uF
	C32		22	nF
	C33		10	nF
	C34		10	nF
	CON1	USB conn.		
LED dioda	D11			
LED dioda	D12			
LED dioda	D13			
	R11		220	$\Omega$
	R12		22	$\Omega$
	R13		22	$\Omega$
	R14		3,9	k $\Omega$
	R15		8,2	k $\Omega$
	R16		3,9	k $\Omega$
	R17		8,2	k $\Omega$
	R18		3,9	k $\Omega$
	R19		8,2	k $\Omega$
	R20		1	M $\Omega$
	R21		330	$\Omega$
	R22		330	$\Omega$
	R23		5	k $\Omega$
	R24		10	k $\Omega$
	R25		5	k $\Omega$
	SW10	switch		
	SW11	switch		
	U11	PIC18F4550, DIP		
	U12	TS1117BCW33		
	U13	RFM12B		
	Y10	20,000		MHz

## D CD Příloha

### Obsah CD

- DP - složka s textem diplomové práce
- MPLAB - složka s projekty pro jednotlivé moduly
- VB - složka s projektem ve Visual Basic
- datasheet - použitá elektronická literatura