VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

MĚŘENÍ ZPĚTNÉHO RÁZU PŘI VÝSTŘELU
RECOIL FORCES MEASUREMENT AFTER SHOT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE — **Radovan Juráň**
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — **doc. Ing. Tomáš Frýza, Ph.D.**
SUPERVISOR

BRNO 2017

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Elektronika a sdělovací technika**
Ústav radioelektroniky

Student: Radovan Juráň ***ID:*** 165411
Ročník: 3 ***Akademický rok:*** 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Měření zpětného rázu při výstřelu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte testovací přípravek pro vývojové zkoušky měření zpětného rázu zbraně po výstřelu. Zkouška zpětného rázu je nedílnou součástí při vývoji simulovaných ručních zbraní ve společnosti SAAB Czech s.r.o. Navrhněte schéma zapojení a desku plošných spojů pro řídicí a měřicí část přípravku.

Osaďte a elektricky oživte navržené zařízení. Realizujte vnitřní firmware mikroprocesoru. Realizujte SW pro zpracování naměřených hodnot v PC. Měření sil zpětného rázu bude realizováno pomocí akcelerometrů. Ověřte funkci vibračního zařízení v testovacích prostorách společnosti SAAB Czech s.r.o. při životnostních zkouškách elektroniky zbraní.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Microchip's 32-bit Microcontrollers [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: http://www.microchip.com/design-centers/32-bit.

[2] LIBERTY, J. Naučte se C za 21 dní. 2., aktualiz. vyd. Překlad Josef Pojsl, Karel Voráček. Brno: Computer Press, 2007. ISBN 978-80-251-1583-1.

Termín zadání: 6.2.2017 ***Termín odevzdání:*** 30.5.2017

Vedoucí práce: doc. Ing. Tomáš Frýza, Ph.D.
Konzultant: Ing. Vladimír Hubík, Ph.D.

prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.
předseda oborové rady

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

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem přípravku pro měření zpětného rázu při výstřelu zbraně. Sestává se ze dvou ucelených bloků. Část vypracovaná jako semestrální projekt v zimním semestru akademického roku 2016/2017 byla zaměřena na návrh hardwarového řešení měřicího přípravku. Jeho osazení, oživení, vývoj firmware a stejně tak i obslužného software pro zpracování výsledků v počítači je předmětem části vzniklé v letním semestru téhož akademického roku k završení bakalářské práce jako celku.

KLÍČOVÁ SLOVA

zpětný ráz, akcelerometr, mikrokontrolér, LIS331, PIC32MM, Bluetooth, low-power

ABSTRACT

The thesis focuses on designing device for recoil forces measurement. First part – the semestral project of winter semester 2016/2017 – was focused on the hardware design. Programming of the firmware and also the software for getting data to PC was created in the summer semester to complete the bachelors thehis as a whole.

KEYWORDS

recoil, accelerometer, microcontroller, LIS331, PIC32MM, Bluetooth, low-power

JURÁŇ, R. *Měření zpětného rázu při výstřelu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2016. 50 s., 5 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Vladimír Hubík, PhD., doc. Ing. Tomáš Frýza, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci na téma Měření zpětného rázu při výstřelu jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

V Brně dne ....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Poděkování patří pánům vedoucím Hubíkovi a Frýzovi za účinnou metodickou, pedagogickou i odbornou pomoc a cenné rady při zpracování mé bakalářské práce, jakož i všem ostatním, kteří poskytli cenné postřehy a rady, a v neposlední řadě také společnosti SAAB Czech s.r.o. za cennou příležitost zpracovat bakalářskou práci se zajímavým tématem a rovněž poskytnuté zázemí při samotné realizaci této práce.

OBSAH

Abstrakt 1

Klíčová slova 1

Abstract 1

Keywords 1

Prohlášení 3

Poděkování 3

Obsah iv

Seznam obrázků vi

Seznam tabulek viii

Úvod 1

1 Teoretické předpoklady 2

1.1 Zpětný ráz z fyzikálního hlediska ... 2

1.2 Zpětný ráz z technického hlediska ... 3

1.2.1 Akcelerometr ... 4

1.3 Koncepce přípravku ... 4

2 Volba součástek 5

2.1 Volba řídicího členu – mikrokontrolér ... 5

2.2 Volba měřicího členu – akcelerometr ... 6

2.3 Volba komunikačního členu – Bluetooth modul ... 8

2.3.1 Historická technická zajímavost o Bluetooth ... 9

2.3.2 Bluetooth low energy ... 9

Volba Bluetooth modulu ... 12

2.4 Napájení zařízení ... 13

3 Návrh hardware 14

3.1 Vnik zapojení a popis jeho schématu ... 14

3.1.1 Napájení ... 14
3.1.2 Spínání napájení přípravku ... 15
3.1.3 Mikrokontrolér ... 16
3.1.4 Akcelerometr ... 18
3.1.5 Bluetooth modul ... 19

4 Vývoj software **20**
4.1 Vývoj firmware ... 20
4.2 Popis firmware ... 22
4.3 Vývoj obslužné aplikace ... 23
4.3.1 Program pro primární zpracování ... 23

5 Prototypy a jejich testování **26**
5.1 Prvotní verze na nepájivém kontaktním poli ... 26
5.1.1 Prototypové čtení dat a prvotní programy ... 26
5.2 První vyrobený prototyp ... 29
5.2.1 Vylepšení designu semestrálního projektu ... 29
5.2.2 Oživení prototypu ... 31
5.2.3 Konec prvního prototypu ... 33
5.3 Finální návrh ... 34
5.3.1 Novinky a změny oproti prototypu ... 36
5.4 Získávání výsledků ... 39

6 Závěr **41**

Literatura **42**

Seznam symbolů, veličin a zkratek **44**

A Schémata zapojení **45**
A.1 Původní obvodové zapojení prototypu ... 45
A.2 Obvodové zapojení finální verze ... 46

B Výrobní podklady **47**

C Seznam součástek **48**
C.1 Seznam součástek k prototypu ze semestrálního projektu ... 48
C.2 Seznam součástek pro finální výrobek ... 49

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 – Samopal MP5, obrázek poskytl SAAB Czech s.r.o. 2
Obrázek 2 – Blokové schéma přípravku 5
Obrázek 3 – Mikrokotrolér PIC32MM0064GPL028, pouzdro SSOP, převzato z [6]. 6
Obrázek 4 – Akcelerometr LIS331, převzato z[34] 7
Obrázek 5 – Modul s akceleromterem LIS331, převzato z [8]. 7
Obrázek 6 – Modul s akcelerometrem MPU6050, převzato z [9]. 8
Obrázek 7 – Logo Bluetooth, převzato z [10]. 9
Obrázek 8 – Runy v logu Bluetooth, převzato z [11][11]. 9
Obrázek 9 - Logo Bluetooth Smart, převzato z [12]. 10
Obrázek 10 – Modul HC05, převzato z [13]. 12
Obrázek 11 – Bluetooth modul RN4020, převzato z [14]. 12
Obrázek 12 – Lithiová CR2032, převzato z [15]. 13
Obrázek 13 – Microchip MCP1640, zdroj [18] 15
Obrázek 14 – Stejnosměrný zvyšující měnič pro lithiový článek 15
Obrázek 15 – Jednotlačítkový spínač/vypínač. 16
Obrázek 16 – zapojení MCU v prototypu 17
Obrázek 17 – zapojení MCU finálního výrobku 17
Obrázek 18 – Ukázka principu přemapování pinu na PIC32MM, převzato z [42] 18
Obrázek 19 – Akcelerometr LIS331. 19
Obrázek 20 – zapojení RN4020 již ve schématu finálního výrobku 19
Obrázek 21 – snímek obrazovky – vývojové prostředí MPLAB X IDE 21
Obrázek 22 – Příklad zobrazení MCU s popisy přiřazených funkcí pinů z MCC PinManager 21
Obrázek 23 – snímek obrazovky – demonstrace průběhu nastavení, odposlech linky TX MCU 22
Obrázek 24 – snímek obrazovky – demonstrace průběhu nastavení, odposlech linky RX MCU 22
Obrázek 25 – snímek obrazovky - Visual Studio 2013 s otevřeným projektem 23
Obrázek 26 – snímek obrazovky – kde hledat informaci o příslušných portech COM Windows 24
Obrázek 27 – snímek obrazovky – náhled na obslužnou aplikaci 25

Obrázek 28 – snímek obrazovky – ukázka konfigurace PuTTY pod Microsoft Windows 10 27
Obrázek 29 – snímek obrazovky – Čtení dat v PuTTY 27
Obrázek 30 – snímek obrazovky – ukázka surového zpracování dat v LibreOffice Calc (Nejde interpretaci měřených dat, obrázek má pouze informativní charakter.) 28
Obrázek 31 – snímek obrazovky – ukázka dvojího přepínaného načítání (na pozadí Octave, v popředí srovnání s PuTTY) 28
Obrázek 32 – lišta pro montáže příslušenství, zdroj [31] 29
Obrázek 33 – fotografie – držák s montáží na zbraňovou lištu 30
Obrázek 34 – fotografie – ukázka prvního vyrobeného prototypu 30
Obrázek 35 – fotografie – přípravek na útočné pušce Samopal vzor 58 v taktické úpravě 31
Obrázek 36 – fotografie – Sa vz. 58, celkový pohled pro lepší představu rozměrů 31
Obrázek 37 – převodník USB TTL UART, převzato z [32] 32
Obrázek 38 – fotografie – finální výrobek 34
Obrázek 39 – fotografie – přípravek v montáži na liště zbraně Remington 783 35
Obrázek 40 – fotografie – uchycení z jiného úhlu 35
Obrázek 41 – fotografie – přípravek na Samopalu Vzor 58 36
Obrázek 42 – Mikrokotrolér PIC32MM0064GPL028, pouzdro uQFN, převzato z [7]. 36
Obrázek 43 – Rozhraní PIC mikrokontroléru a modulu RN420, převzato ze starší verze [21] 37
Obrázek 44 – Aktualizované požadavky na nutné minimální rozhraní PIC-RN4020 [21] 37
Obrázek 45 – fotografie – detail na Bluetooth modul RN4020 38
Obrázek 46 – snímek obrazovky – data přijatá na mobilním telefonu po konfiguraci RN4020 39
Obrázek 47 – snímek obrazovky – ukázka přenosu dat, postupně osa x; y; z; akceleromteru 40
Obrázek 48 – snímek obrazovky – ukázka, jak mohou vypadat přijímaná data na COM portu 40

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 – Srovnání Bluetooth Classic a Smart, překlad, převzato z [23]. 11
Tabulka 2 – Tabulka materiálů 48
Tabulka 3 – Tabulka materiálů finální verze 49

ÚVOD

Tato práce je dokumentací zpracování bakalářské práce na oboru Elektronika a sdělovací technika. Jejím tématem je měření zpětného rázu při výstřelu zbraně. Práce byla zadána společností SAAB Czech s.r.o., kde je zkouška zpětného rázu nedílnou součástí vývoje simulovaných ručních zbraní.

Projekt vznikal ve dvou částech – první se zabývá návrhem zapojení přípravku a návrhem jeho výsledné realizace na desce plošných spojů. Hodnotí se zde základní potřeby projektu a z nich plynoucí celkové pojetí a výběr vhodných prostředků pro jeho realizaci, včetně konkrétních součástek a jejich vzájemné propojení. V letním semestru vznikla druhá část, která tuto snahu rozšířila o vyrobení funkčního prototypu, jeho oživění a také o programové vybavení přípravku a rovněž představuje program pro osobní počítač, který slouží primárně pro sběr dat získaných měřením k jejich dalšímu zpracování. Také pojednává o optimalizaci samotného hardware v průběhu vývoje.

Závěr tvoří zhodnocení kompletního výstupu celé práce, tedy výsledky veškerého vývoje.

1 TEORETICKÉ PŘEDPOKLADY

V této kapitole je představen rozbor projektu z pohledu výzev a požadavků, které jako technický úkol klade. Je zde definován zpětný ráz coby fyzikální i technický jev a představeny možnosti jeho teoretického popisu, výpočtu i měření. Kapitola se také věnuje celkové koncepci měřicího přípravku, která plyne z cílového praktického použití přípravku a definuje základní požadavky na prostředky jeho realizace.

Obrázek 1 – Samopal MP5, obrázek poskytl SAAB Czech s.r.o.

1.1 Zpětný ráz z fyzikálního hlediska

Fyzikálním východiskem pro popis vzniku, existence a chování zpětného rázu je Třetí Newtonův zákon, také známý jako Zákon akce a reakce, který lze interpretovat tak, že vzájemná působení dvou těles jsou stejné velikosti a opačného směru.

Vzájemný vztah síly F_{AB}, kterou působí těleso a na těleso B, a F_{BA}, kterou působí těleso B na těleso A, je tedy z definice následující:

$$\overrightarrow{F_{AB}} = -\overrightarrow{F_{BA}} \quad (1)$$

Je-li F_{AB} akcí, pak F_{BA} je reakcí. Důsledkem tohoto vztahu je, že i úhrnná hybnost těles a a B je konstantní, jinými slovy platí zákon zachování hybnosti.[1]

Při střelbě je aktivní síla přítomna pohybem projektilu kupředu. Tím je vyvolána reaktivní síla, která se působením na zbraň projevuje jako zpětný ráz.

1.2 Zpětný ráz z technického hlediska

U střelných zbraní je zpětný ráz projevem fyzikálních a chemických interakcí, vzniklých bezprostředně po kontaktu zápalníku a zápalky náboje. Tímto kontaktem dojde k zapálení prachové slože náboje. Během tohoto hoření se začnou vyvíjet prachové plyny, které expandují a vytlačují tak střelu z nábojnice a protlačují ji dále vývrtem hlavně. Dochází k vysokému nárůstu rychlosti, a to z nulové až na tzv. ústťovou rychlost, tedy rychlost, s níž projektil opustí hlaveň.

Protože platí zákonitosti uvedené výše v podkapitole 1.1, tak zbraň, která před výstřelem měla nulovou rychlost, se postupně vlivem popsaných procesů rozechvívá a urychluje se opačným směrem oproti směru vystřeleného projektilu. V okamžiku kdy střela opustí hlaveň, dosahuje rychlost zbraně své maximální hodnoty. Tuto hodnotu označujeme jako rychlost zpětného rázu.[26]

Naznačme princip symbolicky. Nechť p_1 je hybnost střely a p_2 hybnost zbraně, pak můžeme psát, že platí:

$$p_1 = p_2.$$

Hybnost je součinem hmotnosti a rychlosti, proto píšeme

$$m_1 \cdot v_1 = m_2 \cdot v_2,$$

kde m_1 je hmotnost střely, v_1 jejích ústťová rychlost, m_2 hmotnost zbraně a v_2 rychlost zbraně vyvolaná proti směru v_1, která vytváří zpětný ráz.

V praxi se také hovoří ještě o nutnosti uvážit reaktivní účinek plynů, které se uvolní při výletu střely z hlavně. Reaktivní zpětný ráz zvyšuje vypočtený zpětný ráz z hybnosti asi o 20 - 30 % v závislosti na velikosti ráže, jak ve svých materiálech uvádí Štursa [26].

Uveďme zde jeden příklad, převzatý z SŠ-COPT Uherský Brod z citovaného materiálu Balistika a konstrukce hlavních dílů zbraní pro 2. ročník předmětu SZb, který zohledňuje uvedené parametry a výpočty. Definuje vzorec pro výpočet očekávaného zpětného rázu:

$$v_z = \left(\frac{q}{Q_z} \cdot v_{ú}\right) \cdot 1{,}25,$$

kde v_z [ms^{-1}] rozeznáváme jako rychlost zpětného rázu, která je rovna podílu hmotnosti střely q [g] a hmotnosti zbraně Q_z [g], vynásobenému ústťovou rychlostí $v_{ú}$ [ms^{-1}] a koeficientem 1,25 [-] pro zohlednění reaktivního zpětného rázu. Citujme zde přesné zadání příkladu z výukové prezentace a uveďme příklad výpočtu: „Z malorážové zbraně byl vystřelen náboj o hmotnosti střely 12 g s ústťovou rychlostí 600 m/s. Hmotnost, této zbraně je 2,4 kg. Urči rychlost zpětného rázu.“ Dosazením do vztahu vypočteme

$$v_z = \left(\frac{12}{2400} \cdot 600\right) \cdot 1{,}25 = 3{,}75\ ms^{-1},$$

tedy u této zbraně bude rychlost zpětného rázu asi 3,75 ms^{-1}.

Uvedené úvahy by se týkaly teoretického výpočtu u reálných zbraní, avšak to je předmětem samotného simulátoru, nikoliv navrhovaného měřicího přípravku. Ten má za cíl pouze snímání této rychlosti (zrychlení). Je třeba tedy dbát správné terminologie a z předložené teorie a odvozených vztahů učinit závěr, že v této práci jde v důsledku přesněji o měření účinků zpětného rázu.

1.2.1 Akcelerometr

Z rychlosti nebo zrychlení lze při známé hmotnosti také určit sílu (energii) zpětného rázu. Právě tento jev je předmětem simulace a měření v této práci. Pro měření vibrací, otřesů a změn zrychlení byly vyvinuty speciální integrované obvody – akcelerometry. Využití akcelerometru zmiňuje i samotné zadání práce a z hlediska projektu jde o jádro měřicí části přípravku.

Akcelerometry jsou elektromechanická čidla, jimiž lze snímat jak změny zrychlení statické, tak i dynamické, a to v závislosti na síle, která působí na hmotu senzoru.[25]

Předmětem zájmu této práce je měření dynamických změn, způsobených pohybem akcelerometru (celé soustavy zbraň – měřicí přípravek), jehož průběh byl popsán v předešlých kapitolách.

Akcelerometry pracují na nejrůznějších technologiích, které se v průběhu času vyvíjely. Už na počátku 20. století byly představeny první akcelerometry, které ke své funkci využívaly piezorezistivní materiál, jehož prostřednictvím převáděly sílu vzniklou urychlovanou hmotou na změnu jejího elektrického odporu. Jiné principy mohou využívat piezoelektrického jevu při deformování piezoelektrického materiálu. Moderní technologií jsou tzv. MEMS zařízení, tedy Micro – Electro – Mechanical – Systems. MEMS akcelerometr je elektromechanický, založený na proměnné kapacitě tříelektrodového vzduchového kondenzátoru.[29]

1.3 Koncepce přípravku

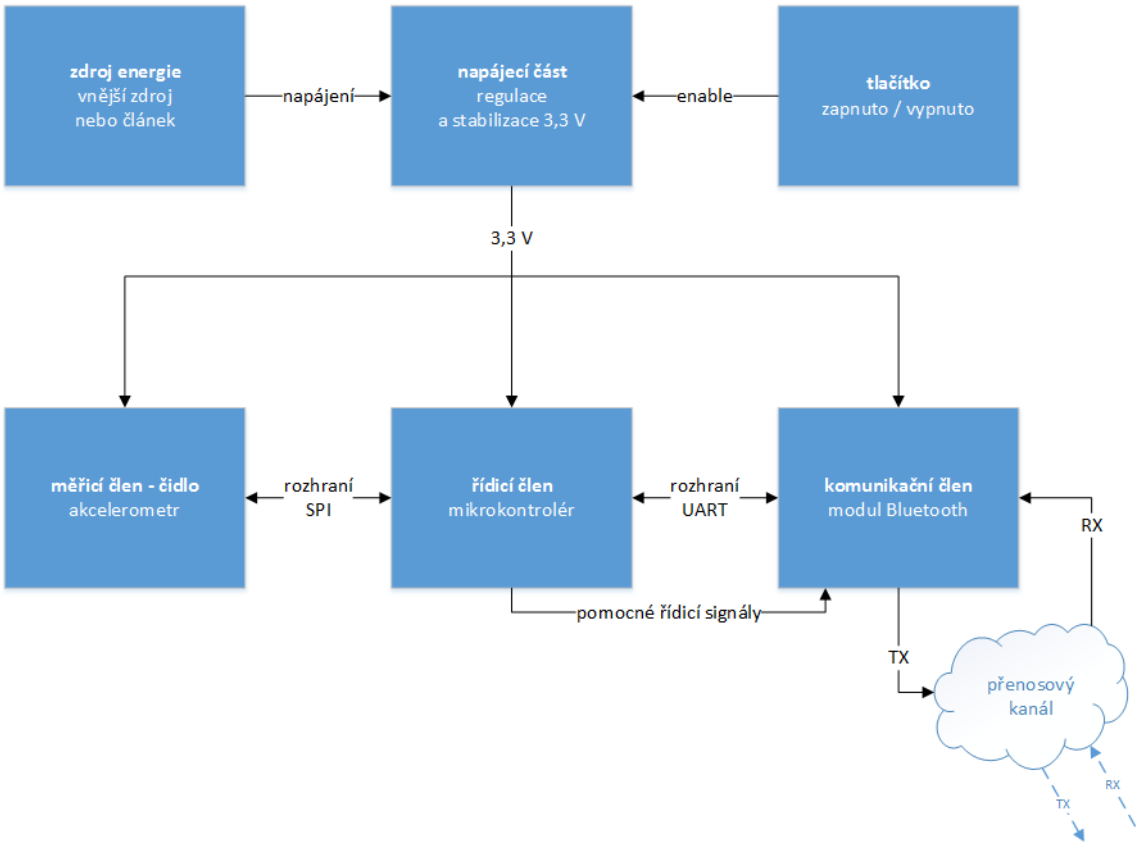
Celkové provedení přípravku je cíleno na vytvoření kompaktního a rozměrově úsporného zařízení. Zadání obecně příliš neklade konkrétní požadavky na realizaci, a tak většina navržené práce vznikla jako samostatná práce, od návrhu po stránce samotné elektroniky až k mechanické stránce práce, například způsob upevnění a výběr dostupného držáku.

Zadání také neobsahuje konkrétní požadavek na způsob vzájemné datové komunikace měřicího přípravku a počítače. Bylo tedy po úvodní konzultaci zadání práce přímo v SAAB zvoleno a schváleno bezdrátové řešení, a to zejména s ohledem na jeho kompaktnost a praktičnost při používání přípravku.

Takovéto řešení si však žádá zvolit vhodné napájení zařízení. Počítá se mimo pevné napájení napájecími vodiči i s bateriovým napájením, což zvýší kompaktnost. Bateriové napájení v důsledku vede na zaměření návrhu na nízkou výslednou spotřebu zařízení jako celku (low–power design). Na tento záměr je orientován celý návrh: výběr součástek vhodných pro tuto aplikaci a snaha využít mechanismů úspory spotřeby energie, ať už hardwarovou nebo softwarovou cestou, případně jejich vzájemnou kombinací. Konkrétní principy budou zdůrazněny v průběhu textu. Je třeba také nalézt kompromis mezi úsporou energie a kýženými výsledky aplikace přípravku. Pro dlouhodobá měření, ale také ladění přípravku jsou osazeny piny pro připojení napájecího napětí pouze pomocí vodičů z externího zdroje.

2 VOLBA SOUČÁSTEK

První kapitola představila požadavky, z nichž druhá kapitola vychází při volbě prostředků, jimiž bude možno stanovených cílů dosáhnout. Podkapitoly respektují blokové schéma přípravku a slouží v podstatě coby jeho detailní rozbor a popis, kde je komentován výběr dílčích členů systému.



Obrázek 2 – Blokové schéma přípravku

2.1 Volba řídicího členu – mikrokontrolér

S ohledem na energetické nároky, dostačující výkon a podporu periferií je třeba volit optimální řídicí člen přípravku, tedy vhodný mikrokontrolér. Ačkoliv konkurence je na trhu velká a mnozí výrobci nabízejí vhodné čipy pro tento typ aplikace, společnost SAAB používá ve svých elektronických zařízeních MCU značky Microchip, a proto byl dodržen firemní standard a již při první konzultaci byla pro tento projekt zvolena rodina mikrokontrolérů Microchip PIC32MM, určená svými parametry a vybavením právě pro zařízení s nízkou spotřebou.

Tato 32bitová rodina procesorů s redukovanou instrukční sadou (RISC) je dodávána na trh jako 16-, 32- nebo 64KB varianta ve standardních pouzdrech [3]. Pro aplikaci v přípravku je z hlediska rozměrů vhodné orientovat se při volbě spíše na

některé z menších, kompaktnějších pouzder jako je SSOP či uQFN.

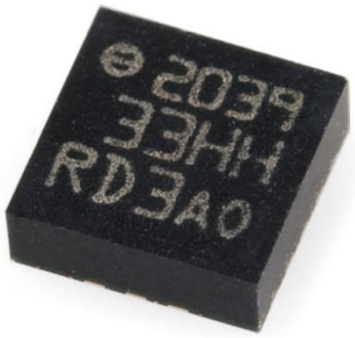
Výrobce v katalogových listech vždy doporučuje umístění například blokovacích nebo filtračních kondenzátorů co nejblíže čipu, datové spoje pro některé sběrnice co nejkratší apod. [4], což klade nároky na desku plošných spojů a výsledné rozmístění součástek, a rovněž je potřeba brát ohled na budoucí vývoj firmware. Proto byla pro účely prototypu zvolena 64KB varianta PIC32MM0064GPL028 FAMILY v SSOP pouzdře SMD s ohledem na pružnější návrh, daný zejména fyzickými rozměry a rovněž dostatečnou kapacitou paměťového prostoru. Pro účely prototypu byla podle technické dokumentace Microchip v návrhovém prostředí programu Autodesk Eagle vytvořena vlastní knihovna (součástka), obsahující potřebné informace k začlenění tohoto integrovaného obvodu do návrhu desky plošných spojů.

Obrázek 3 – Mikrokotrolér PIC32MM0064GPL028, pouzdro SSOP, převzato z [6].

Finální výrobek byl upraven pro variantu pouzdra uQFN, pro nějž byla rovněž vytvořena zvláštní knihovna v Eagle podle katalogových listů. Okolnosti úprav finálního výrobku popisuje kapitola 5.3 Finální návrh.

2.2 Volba měřicího členu – akcelerometr

Na doporučení vycházející ze zkušeností společnosti SAAB byl zvolen akcelerometr LIS331 od STMicroelectronics. Svými parametry podporuje úsilí o návrh obvodu s nízkou spotřebou a rovněž dostačuje a vyhovuje aplikaci co do přesnosti a rychlosti měření změn zrychlení ve všech třech svých osách.



Obrázek 4 – Akcelerometr LIS331, převzato z[34]

Obrázek 5 – Modul s akceleromterem LIS331, převzato z [8].

Podobným konkurenčním produktem je například MPU6050 (Obrázek 6), který je oblíbený mezi uživateli platformy Arduino.

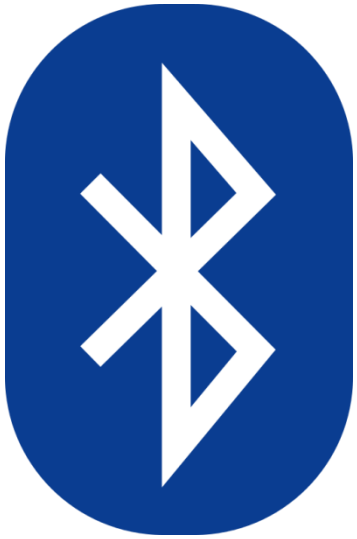
Obrázek 6 – Modul s akcelerometrem MPU6050, převzato z [9].

Oba ukázané komerčně dostupné moduly se zmíněnými akcelerometry byly při vypracovávání projektu pořízeny pro bližší zkoumání a testování nejen v rámci této práce, kde modul s LIS331 posloužil k vytvoření prvotního prototypu, o němž hovoří část 5.1 této práce s názvem Prvotní verze na nepájivém kontaktním poli.

2.3 Volba komunikačního členu – Bluetooth modul

Bezdrátová komunikace přípravku s počítačem je rozhodnutím rozšiřujícím nad rámec zadání práce, které ale logicky vyplynulo z cílové aplikace přípravku. Jedním z nejběžnějších standardů používaných zařízeními tohoto typu pro bezdrátovou komunikaci je Bluetooth.

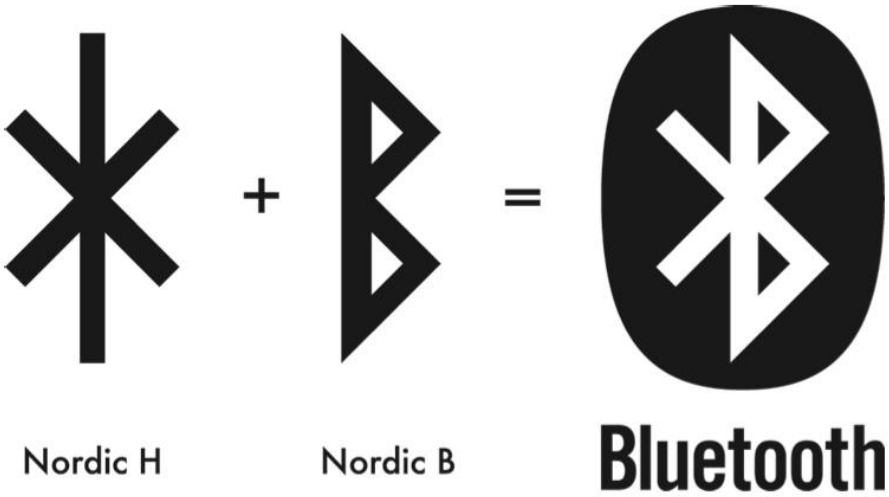
Bluetooth je definovaný v rámci IEEE 802.15.1. jako otevřený standard pro bezdrátovou komunikaci. Prošel vývojem a v současnosti je nejrozšířenější verze 4.1, která mimo jiné přednosti umožňuje dosáhnout zejména nižší spotřeby energie a lepší datové propustnosti. Bluetooth pracuje v ISM (industrial, scientific and medical) pásmu 2,4 GHz. Využívá mechanismy přenosu dat, které zabraňují rušení, jako například kódový mnohonásobný přístup na principu rozprostřeného spektra FH-SS (Frequency Hopping Spread Spectrum), tedy přenos v rozprostřeném spektru s přelaďováním mezi několika frekvencemi při přenosu dat.



Obrázek 7 – Logo Bluetooth, převzato z [10].

2.3.1 Historická technická zajímavost o Bluetooth

Zajímavostí je původ názvu standardu, který vzešel z anglického jména dánského krále Haralda Modrozuba (blue tooth znamená v angličtině modrý zub), který vládl v 10. století. Ten se proslavil sjednocením Skandinávie, když využil diplomacie a přivedl tak válčící nesourodé kmeny k diskusi a ukončily se tak vzájemné spory. Právě tato historická analogie inspirovala název technologie Bluetooth, která podobně jako král Harald usnadňuje vzájemnou výměnu informací jinak nesourodých prvků.[22] Rovněž logo standardu je připomínkou Haralda samotného - vzniklo sloučením jeho iniciál, zapsaných ve skandinávských runách:



Obrázek 8 – Runy v logu Bluetooth, převzato z [11][11].

2.3.2 Bluetooth low energy

Ve skupině Bluetooth Special Interest Group (SIG) je definován Bluetooth Smart, u nějž existují dva režimy: dual-mode (Smart-Ready) a single-mode, známý jako

Bluetooth Low-Energy (BTLE).

Obrázek 9 - Logo Bluetooth Smart, převzato z [12].

Bluetooth Smart lze nalézt zejména v soudobých přenosných zařízeních, u nichž je z jejich podstaty předpoklad nároků na vysokou konektivitu v rovnováze s co nejnižší spotřebou energie. Je zamýšlen k poskytnutí znatelně snížené spotřeby a ceny při zachování komunikačního rozsahu. Přináší také jednoduchost a rychlost. BTLE lze využít snadno jako bezdrátová náhrada sériové linky (UART).[42]

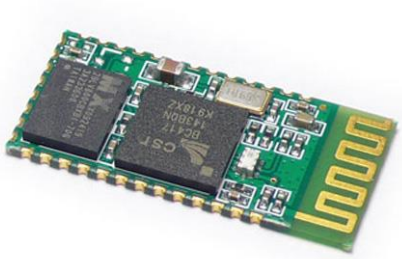
Tabulka 1 – Srovnání Bluetooth Classic a Smart, překlad, převzato z [23].

Specifikace	**Bluetooth Classic**	**Bluetooth Smart**
Vzdálenost	100 m	>100 m
Data rate	1–3 Mbit/s	1 Mbit/s
Propustnost	0.7–2.1 Mbit/s	0.27 Mbit/s
Aktivní zařízení slave	7	Nedefinováno, závisí na implementaci
Bezpečnost	56/128-bit a uživatelsky definovaná aplikační vrstva	128-bit AES s Counter Mode CBC-MAC a uživatelsky definovaná aplikační vrstva
Robustness	Adaptivní změna frevence, FEC, fast ACK	Adaptivní změna frevence, Lazy ACK, 24-bit CRC, 32-bit MIC
Odezva	100 ms	6 ms
Maximální čas pro odeslání dat	100 ms	3 ms
Topologie sítě	Rozptýlená síť	Rozptýlená síť
Spotřeba energie	1 W	0,01 až 0,50 W (závisí na použití)
Špičková proudová spotřeba	<30 mA	<15 mA
Některé oblasti použití	Mobilní telefony, hry, headsety, audio streamování, chytré domy, nositelná elektronika, automotive, PC, zabezpečení, medicínské aplikace, sport,…	Mobilní telefony, hry, schytré domy, nositelná elektronika, automotive, PC, zabezpečení, medicínské aplikace, sport, průmysl,…

Volba Bluetooth modulu

Dostáváme se k volbě způsobu realizace komunikačního zapojení, vyžívajícího Bluetooth. Rozhodování je usnadněno dostupností Bluetooth modulů. Moduly umožňují využít již hotová obvodová řešení, která lze díky vhodným standardním rozhraním snadno navázat na zbytek systému.

Dostupnou možností je například modul HC-05. Jeho koncepce je celkově jednodušší, avšak pro potřeby komunikace měřicího přípravku s počítačem je zatěžující vyšší spotřeba ve srovnání s novějšími standardy.



Obrázek 10 – Modul HC05, převzato z [13].

Jelikož je práce postavena v jádru na architektuře firmy Microchip, nabízí se od téhož výrobce jako zajímavé řešení například modul RN4020. Tento modul je orientován na zařízení s nízkou spotřebou. Příslušným nastavením pomocí příkazů je možné využít jeho dostupné módy a následně jej po připojení otevřít jako sériovou linku. Data jsou přímo odesílána na připojené zařízení.

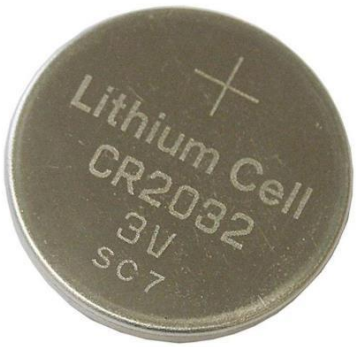
Obrázek 11 – Bluetooth modul RN4020, převzato z [14].

Popis průběhu procesu komunikace a výměny dat přípravku s PC je popsán v kapitole, která se zabývá softwarovou částí, tedy 4.1.

2.4 Napájení zařízení

Jak již bylo zmíněno v úvodu, zařízení je navrhováno i s možností bateriového napájení. Je tedy potřeba věnovat se volbě vhodného zdroje energie, návrhu jeho stabilizace a celého napájecího obvodu pro zařízení.

Jelikož není plánovaný dlouhodobý provoz, použité součástky nejsou náročné na odběr proudu a současně požadujeme nízkou hmotnost, jeví se jako varianta lithiová baterie s kapacitou v řádech stovek mAh.



Obrázek 12 – Lithiová CR2032, převzato z [15].

Napájecí vstup je ale univerzální – je možné připojit k pinům napájení jakýkoliv jiný článek, baterii či akumulátor o napětí 3 V. Přesněji uvádí dokumentace měniče MCP1640 popsaného níže, že vstupní napětí musí být menší než výstupní a zároveň celkově méně než dovolené maximum 5,5 V, což ale nebylo prakticky otestováno, protože na výstupu požadujeme 3,3 V.

Kromě bateriového zdroje je připravena možnost připojení napájecího napětí vodiči z libovolného externího zdroje. To umožní neomezený provoz při programování, ladění a rovněž použití ve statických podmínkách zkušebny či střelnice a zajistí univerzální použití v případě, že nároky na napájení přesáhnou očekávání a baterie se vybije.

Není přítomen žádný nabíjecí obvod; je nutné mít na paměti, že zdroje není možné souběžně kombinovat.

3 NÁVRH HARDWARE

V předešlých kapitolách byly pojmenovány výchozí požadavky a s ohledem na ně byly vybrány prostředky jejich realizace. Tato kapitola pojednává o samotném návrhu prototypu, tedy vzájemnému propojení dílčích zvolených členů.

3.1 Vnik zapojení a popis jeho schématu

Tato kapitola představuje lokální výřezy z celkového schématu, jež lze nalézt kompletní v přílohách této práce. Tyto výřezy doplňuje komentářem, který přináší vysvětlení principu zapojení a jeho účelu v rámci celého systému. Všechny zde představené obrázky schémat jsou vlastním dílem autora práce. (Vznikly exportem z návrhového programu desek plošných spojů Autodesk Eagle, v němž celý návrh probíhal.)

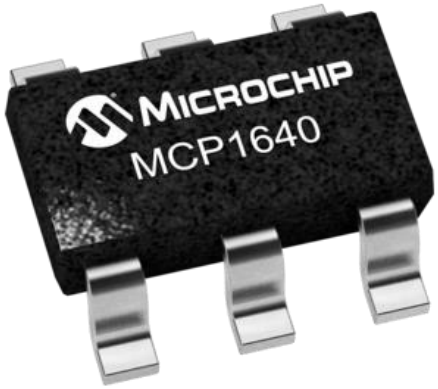
Výsledný hardware je výsledkem několika vývojových iterací. Zařízení bylo navrženo v logickém sledu nejprve jako prototyp a následně upraveno ve finální verzi. Zároveň je dodržen postup směrem od funkce k optimalizaci. Jako zdroj informací ohledně návrhu byla použita kniha *Designing Embedded Hardware* [1], z níž v práci není přímo citováno, ale pomohla při orientaci v problematice návrhu embedded systému.

V rámci záměrné miniaturizace byly voleny primárně SMD (surface mount device), tedy bezvývodové součástky.

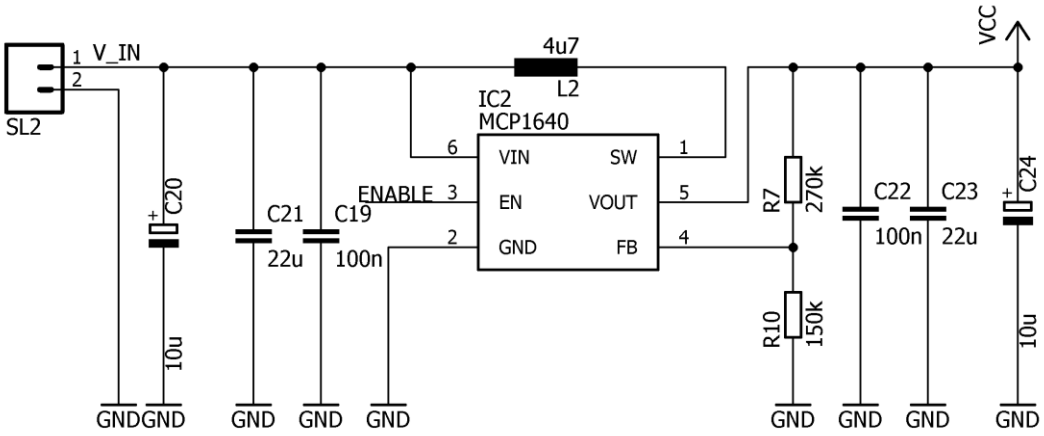
3.1.1 Napájení

Na desce plošných spojů je místo pro držák lithiové baterie a konektor pro připojení jiných externích zdrojů energie.

Protože baterie vlivem vybíjení postupně ztrácí napětí, je k ní přidán stejnosměrný zvyšující měnič MCP1640, jehož zapojení vychází z katalogového listu [18]. Jeho výstupní napětí je určeno odporovým děličem R8, R9. MCP1640 je vyráběn ve více variantách, zde je volena varianta B s funkcí „True Disconnect“, která umožňuje nastavením logické úrovně pinu číslo 3 vypínat a zapínat zdroj jediným signálem ENABLE (viz schéma níže). [18]. Úroveň signálu ENABLE je řízena jednotlačítkovým spínáním (respektive vypínáním), jehož princip je popsán níže v rámci této kapitoly.



Obrázek 13 – Microchip MCP1640, zdroj [18]

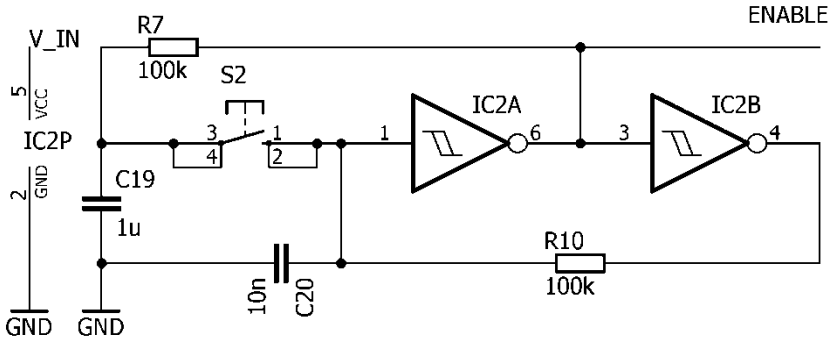


Obrázek 14 – Stejnosměrný zvyšující měnič pro lithiový článek

3.1.2 Spínání napájení přípravku

Zařízení je zapínáno i vypínáno jediným tlačítkem. Existuje mnoho způsobů, jak zapojit funkci jednotlačítkového spínání obvodově, například za pomoci rozšířeného časovače NE555. [24] V zařízení je ale použita jiná známá varianta, a to s využitím dvou Schmidtových kopných obvodů. [27] Za pomoc s její realizací patří poděkovaní panu doktorovi Michalu Kubíčkovi.

Vlastností Schmidtova klopného obvodu je hystereze, která je v jiných případech mnohdy nežádoucí, ale v této aplikaci zabraňuje vzniku zákmitů výstupního signálu v okolí střední úrovně spínání, což je typické pro mechanické spínače a tlačítka, kde se se sepnutím projeví zákmity, které mohou způsobit rušivé signály, vedoucí až k pojmu, který označujeme jako hazard (nežádoucí parazitní změny logických úrovní).

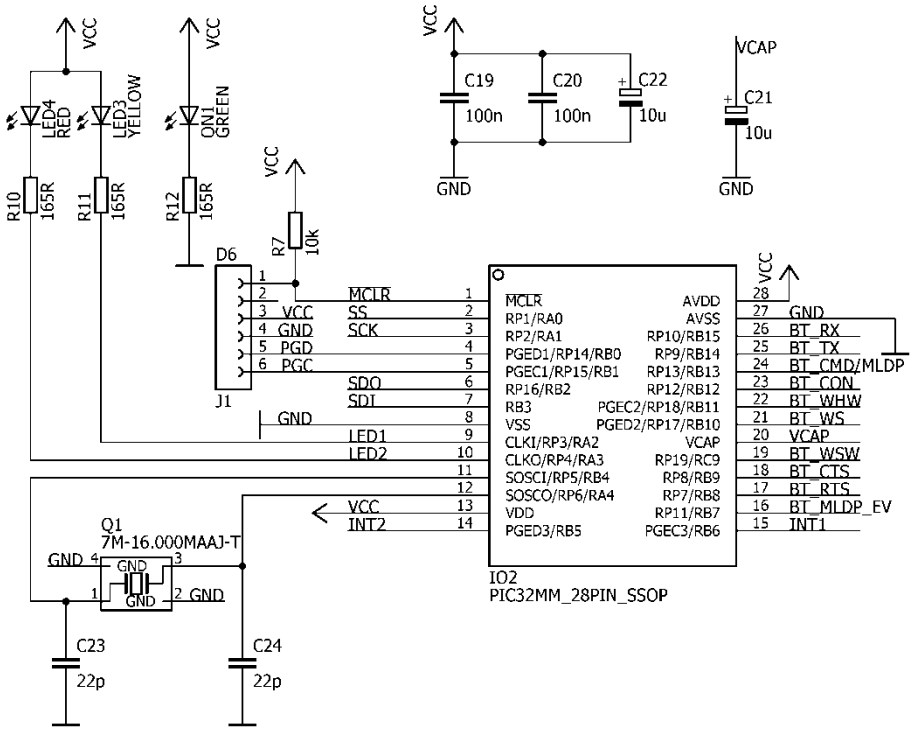


Obrázek 15 – Jednotlačítkový spínač/vypínač.

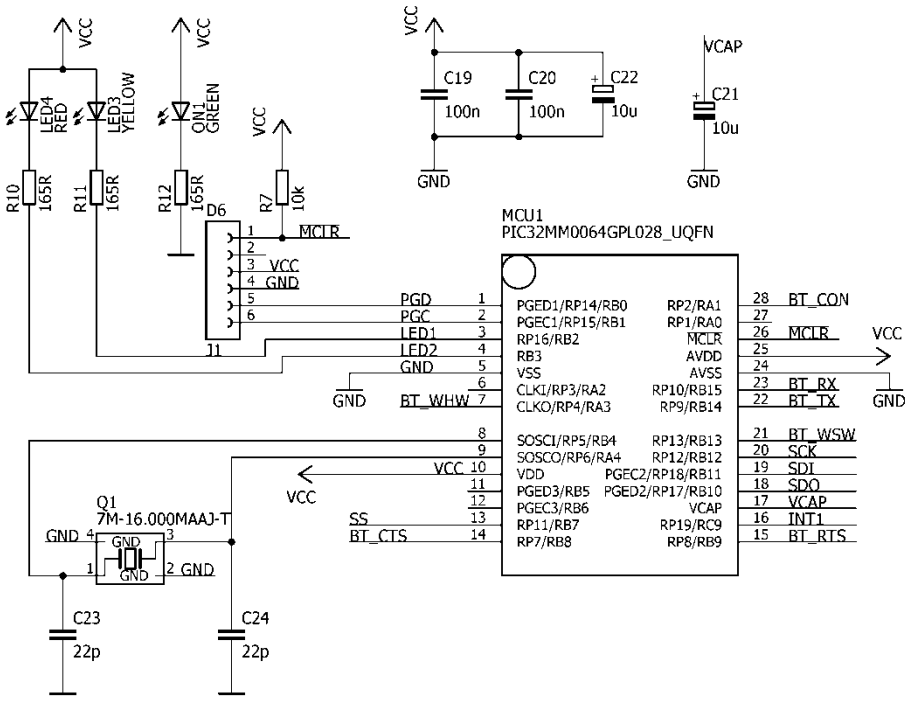
Princip spočívá v přelévání energie pomocí kondenzátorů a zpětných vazeb vždy se změnou logické úrovně stiskem tlačítka, čímž dohází k vzájemnému překlápění klopných obvodů. To se projevuje na výstupu ENABLE změnou logické úrovně. Tou je řízen (spínán, respektive vypínán) zdroj.

3.1.3 Mikrokontrolér

Zapojení mikrokontroléru vychází z katalogových doporučení výrobce. Je napájen napětím 3,3 V, které z připojeného zdroje energie udržuje a stabilizuje výše popsaný stejnosměrný zvyšující měnič MCP1640. V zapojení jsou použity také doporučené kondenzátory, které výrobce doporučuje keramické coby blokovací a filtrační a tantalových je pak užito namísto elektrolytických zejména pro jejich rozměr a dostatečnou dostupnou kapacitu. Pro programování je použito standardní ICSP rozhraní, jemuž přísluší piny na desce plošných spojů podle schématu. K tomuto rozhraní je připojován externí programátor PICkit3. Celkový pohled na zapojení přináší následující obrázky, kde prototyp obsahuje kromě chybně zapojených signálů také signály navíc, kterých nebylo ve finální verzi pro úsporu místa na desce plošných spojů užito, a namísto toho byly ponechány jen signály zásadní pro správnou funkci a jen některých doplňkových.



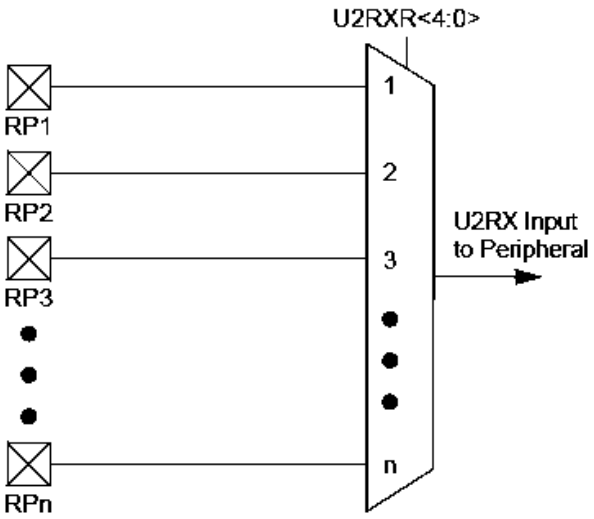
Obrázek 16 – zapojení MCU v prototypu



Obrázek 17 – zapojení MCU finálního výrobku

Zajímavým problémem je u použitého mikrokontroléru fakt, že primární rozhraní UART (označen výrobcem UART1) i SPI (označen výrobcem SPI1) fyzicky sdílejí některé piny. Řešení je u PIC32MM důmyslné – toto MCU podporuje softwarové přesměrování (anglicky remapping, doslova přemapování) sekundárních komunikačních rozhraní (například sekundární UART2, či SPI2 atp.) na některý z pinů označených v katalogových listech jako RPx, kde RP zkracuje slovo remappable, x označuje číslo pinu, takže lze čistě softwarově problém elegantně vyřešit. Podstatou této možnosti je nastavení příslušných interních registrů MCU, které nastavují multiplexory, jimiž je řízena funkce daného pinu.

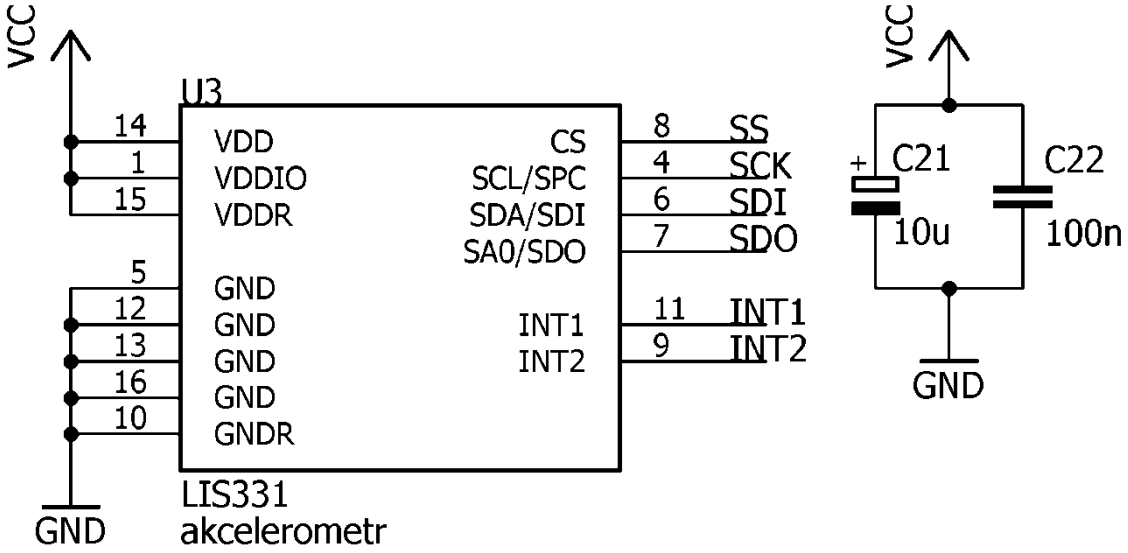
Princip přemapování ukazuje Obrázek 18 – Ukázka principu přemapování pinu – nastavení interního registru U2RXR řídí multiplexor, jehož vstupní signály jsou piny RPx, z nichž lze vybrat, který bude náležet přijímací pinu RX periferie UART2, výstupem je pak přímo signál U2RX pro UART2.



Obrázek 18 – Ukázka principu přemapování pinu na PIC32MM, převzato z [42]

3.1.4 Akcelerometr

Akcelerometr LIS331 nevyžaduje mnoho podpůrných součástek – je zapojen podle doporučení výrobce v katalogových listech, které bylo dodrženo rovněž u ukázaného komerčně dostupného modulu. V zapojení je vidět rozhraní SPI, piny pro využití přerušení a dva kondenzátory o předepsané kapacitě 10 a 100 nF.[17] Ve schématu je vzhledem k přemapování pinů MCU potřeba dát pozor na to, že popis SPI signálů je vzhledem k akcelerometru, nikoliv vzhledem k rozhraní MCU, které lze přemístit a piny tak případně prohodit.

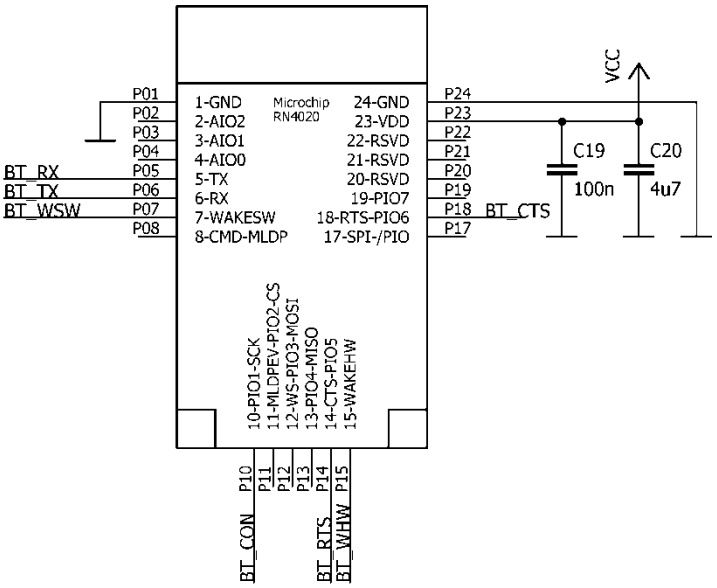


Obrázek 19 – Akcelerometr LIS331.

3.1.5 Bluetooth modul

K napájení modulu jsou připojeny filtrační a blokovací kondenzátory, jejichž hodnoty 100 nF (keramický) a 4,7 μF (tantalový) doporučuje výrobce v katalogu.[21]

Modul komunikuje s mikrokontrolérem rozhraním UART. Jde o zařízení, které disponuje připravenou sadou příkazů a opovědí (například sdělení stavu, dokončení operace, restart, ukončení, atp.), takže jej lze ovládat pomocí AT příkazů a vyčkávat na odpovědi. Více informací přináší kapitoly o firmware a rovněž přehledný dokument od společnosti Microchip, který je využit a konzultován jako jeden z hlavních zdrojů zejména při návrhu a tvorbě programového vybavení v bakalářské práci [20].



Obrázek 20 – zapojení RN4020 již ve schématu finálního výrobku

4 VÝVOJ SOFTWARE

Kapitola s názvem Vývoj software představuje podniknuté kroky v rámci zadání letního semestru, tedy celkovou práci odvedenou v oblasti vývoje firmware a obslužného software přípravku. O oživování a osazování je pojednáno až dále, společně a v souvislosti s testováním prototypů.

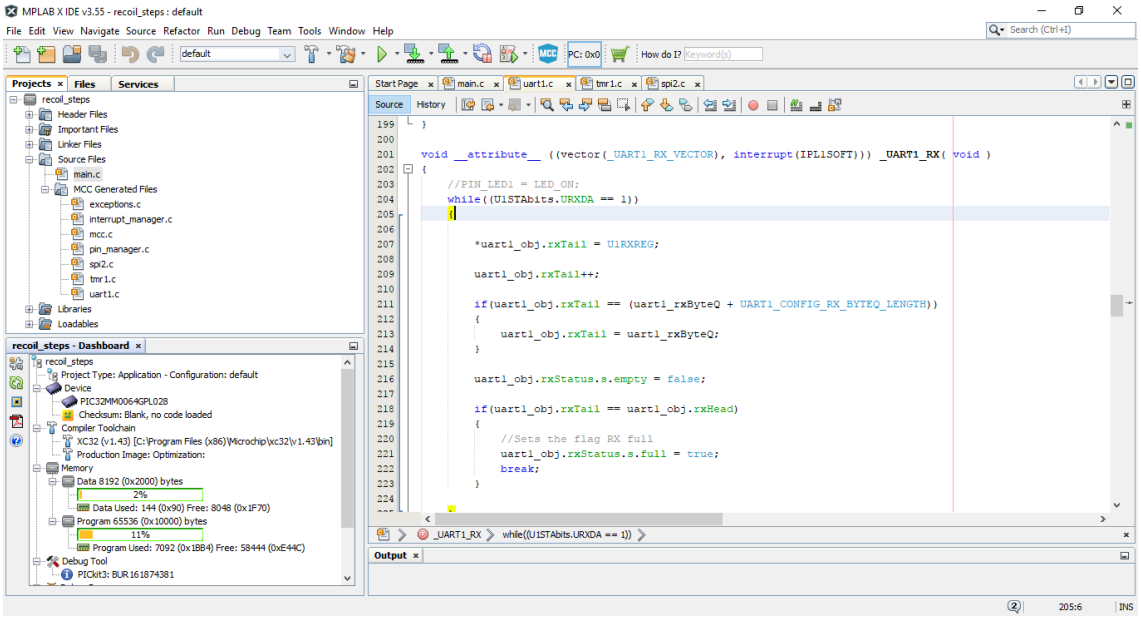
Existuje několik přístupů k firmware embedded systémů, ať je to psaní vlastního kódu a využití například dostupných knihoven nebo malých znovupoužitelných kusů programového kódu (anglicky snippet), anebo u rozsáhlejších systémů s větší režií úloh například využití Operačního systému reálného času (RTOS, Real time operating system). [37] Vzhledem k jednoúčelovosti zařízení a relativně malému počtu vykonávaných úloh by nasazení RTOS bylo nadbytečným řešením, přesahující účel i prostředky zařízení. Přistoupilo se tedy k vývoji vlastního obslužného programového kódu, jehož tvorbu popisuje tato kapitola.

4.1 Vývoj firmware

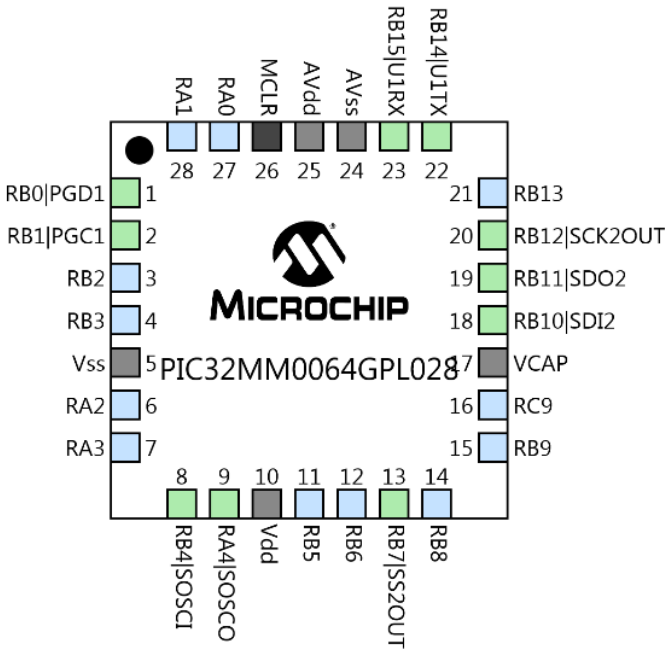
Programové vybavení zařízení bylo vyvíjeno kompletně v integrovaném vývojovém prostředí MPLAB IDE (Integrated Development Environment, Vývojové prostředí), které poskytuje pro své zařízení přímo společnost Microchip, tedy výrobce použitého mikrokontroléru.

Prostředí je velmi robustní a je vybaveno všestrannými nástroji výrazně zpříjemňujícími práci programátora, jako například rozšiřující nástroj Code Configurator (MCC). Ten umožňuje velmi přehledně nástrojem PinManager spravovat veškeré vstupy, výstupy, periferie a systémová nastavení mikrokontroléru a v reálném čase tato nastavení interpretuje rovněž graficky na obrázku zvoleného MCU. Díky tomuto nástroji není tedy nutné vytvářet běžné funkce pracně od samého začátku, nebo ručně nastavovat konfigurační registry MCU, jež by bylo nutné pracně vyhledávat v jeho manuálu, a je možné soustředit se na vlastní jádro programu. Poskytuje i bohaté komentáře osvětlující princip funkcí, s nímž je nutné se seznámit pro úspěšné použití v návrhu. Veškerý kód je generován a psán v jazyce C. Komentáře pak v jazyce anglickém z důvodu zachování konzistence s generovaným kódem a přejatými funkcemi.

Náleží zde uvést prohlášení o dbaní autorských práv a vyhrazení práv společnosti Microchip na zdrojové kódy poskytnuté generátorem anebo jako demonstrační ukázkové kódy. Veškeré jsou opatřeny příslušnou hlavičkou s podmínkami užití a byly pouze editovány a kráceny. Zbylý kód je vlastním dílem – provazuje funkce generované MCC, získané na stránkách Microchip a doplňuje vlastními funkcemi pro nastavování připojených periferií mikrokontroléru. Veškeré nároky náleží tvůrcům příslušných pasáží a jejich korespondujícím nabyvatelům.



Obrázek 21 – snímek obrazovky – vývojové prostředí MPLAB X IDE



Obrázek 22 – Příklad zobrazení MCU s popisy přiřazených funkcí pinů z MCC PinManager

Společnost Microchip myslí rovněž i na podporu svých Bleutooth modulů, a tak pro účely užití RN4020 také uvolnil volně ke stažení ukázkový projekt, z něhož byly převzaty zejména mechanismy pro zpracování AT příkazů a příslušných odpovědí na ně a také postup při správné obsluze UART rozhraní PIC mikrokontroléru.

Samotné nahrávání programu do přípravku zabezpečil programátor PICkit3, připojený k PC přes USB a k přípravku 6 vodiči rozhraní ICSP. Ten komunikuje přímo s MPLAB, z nějž je přeložený program přímo nahrán do MCU.

4.2 Popis firmware

Firmware obstarává řídicí a komunikační proces přípravku. Lze jej shrnout do těchto kroků:

1. Konfigurace zařízení po zapnutí a na navázání spojení s přijímacím zařízením.
2. Správa měření.
3. Sběr dat a jejich cyklické odesílání do připojeného zařízení.

Výchozím krokem je inicializace systémových nastavení MCU, která obnáší připravení celkového nutného zázemí pro obsluhu periferií a vykonání programu. Stěžejní je konfigurace Bluetooth modulu a datové výměny MCU-akcelerometr.

Mikrokontrolér s Bluetooth modulem je komunikačně vázány přes UART, konfigurovaným se symbolovou rychlosti 115200 bps v režimu 8N1, tedy 8 datových bitů bez parity a jedním stop bitem. Pro testovací účely je zde zahrnuta také funkce harwarové kontroly datového toku (flow control), pro niž jsou připraveny dva signály RTS (request to send, požadavek na zaslání) a CTS (clear to send, souhlas připravenosti k zasílání). Kromě toho také řídicími signály WAKE_SW (wake sleep wake, buzení modulu z režimu spánku), WAKE_HW (wake hardware form Dormant state, buzení z klidového stavu) a CON (connected, připojeno).

MCU příslušnými piny řídí hardwarově stavy modulu. Nejprve jej probudí a uvede do příkazového módu (Command). Následně posílá připravené konfigurační a řídicí příkazy, definované a zevrubně komentované v příslušném manuálu modulu [20], které jsou posílány v daném pořadí vždy po obdržení odpovědi na předchozí příkaz od modulu.

Tvar příkazů i korespondujících odpovědí je vždy posloupností znaků ASCII (American Standard Code for Information Interchange) samotného příkazu a dvou ukončovacích znaků – dvojicí CR (carriage return, zakončovacího znaku příkazového řádku) a LF (linefeed character, znaku rozpoznávaného jako znak konce řádku). Stručně nejprve dochází ke vstupu modulu do příkazového módu modulu (command mode), kde je provedena nutná konfigurace, a poté dojde k restartu modulu a přechodu do režimu odesílání dat. Command mode se opustí nastavením nízké úrovně WAKE_SW.

Obrázek 23 – snímek obrazovky – demonstrace průběhu nastavení, odposlech linky TX MCU

Obrázek 24 – snímek obrazovky – demonstrace průběhu nastavení, odposlech linky RX MCU

Po uvedení komunikačního modulu do provozu se připraví i komunikace akcelerometru s MCU přes rozhraní SPI konfigurací nutných registrů a pinů.

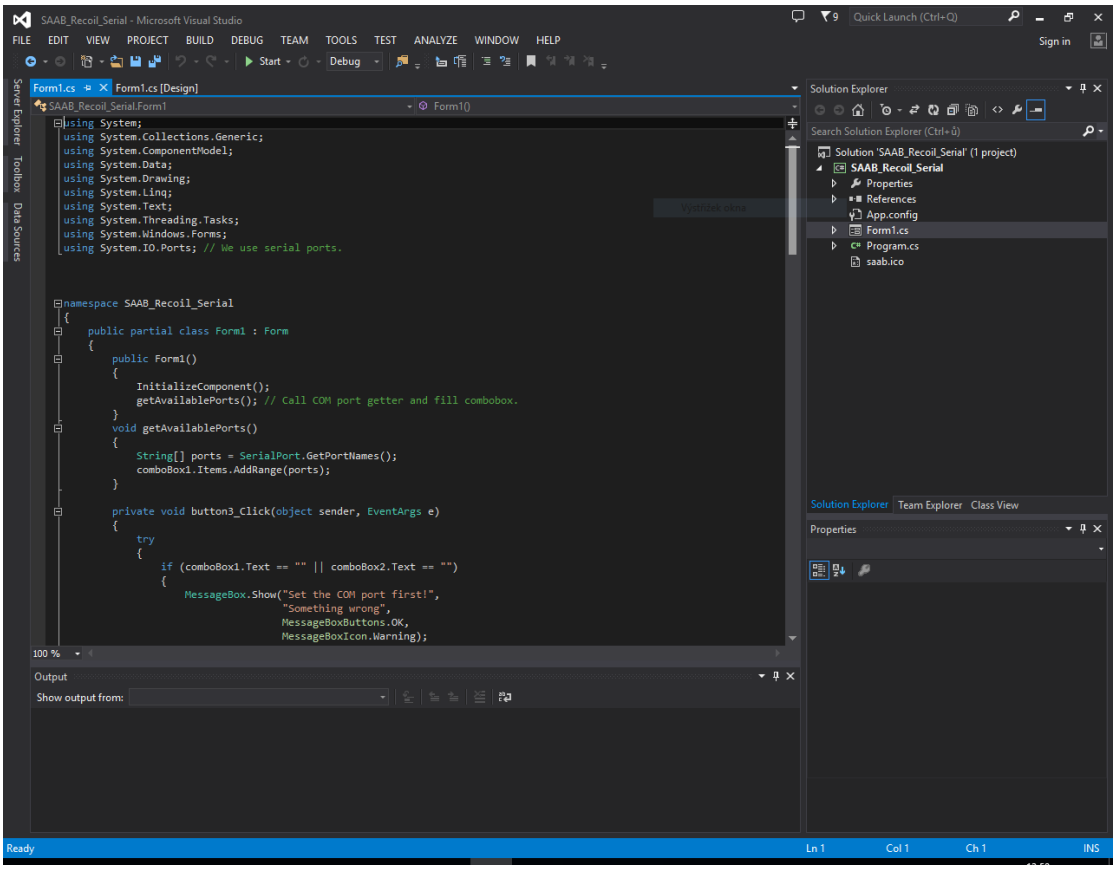
Pak je již celý systém připraven ve výchozím stavu začít odesílání dat po Bluetooth. Celé řízení a výměna dat je od tohoto okamžiku vlastně duplexní sériový komunikační kanál přes sériovou linku na komunikační COM port počítače, kde je připojen jeho Bluetooth rozhraní. Dochází k přesouvání jednotlivých bajtů nesoucích data, příkazy a signalizaci stavu podle potřeb a aktuálního dění.

4.3 Vývoj obslužné aplikace

4.3.1 Program pro primární zpracování

IDE Microsoft Visual Studio 2013 se stalo výchozím prostředím pro tvorbu obslužného programu. Základ zdrojového kódu (funkce pro tvorbu formulářových aplikací) je generován samotným IDE, což velmi urychlilo tvorbu jednoduchého obslužného a přijímacího programu.

Celý program je tvořen pomocí jazyka C#, protože kromě jeho předností je důvodem jeho užití fakt, že autor vývojového prostředí, společnost Microsoft, již dále nepodporuje původně zamýšlené C++ pro tvorbu formulářových aplikací ve Visual Studio, jak uvádí mimo jiné zdroje například i kniha *Mastering Visual studio .NET* [43].



Obrázek 25 – snímek obrazovky - Visual Studio 2013 s otevřeným projektem

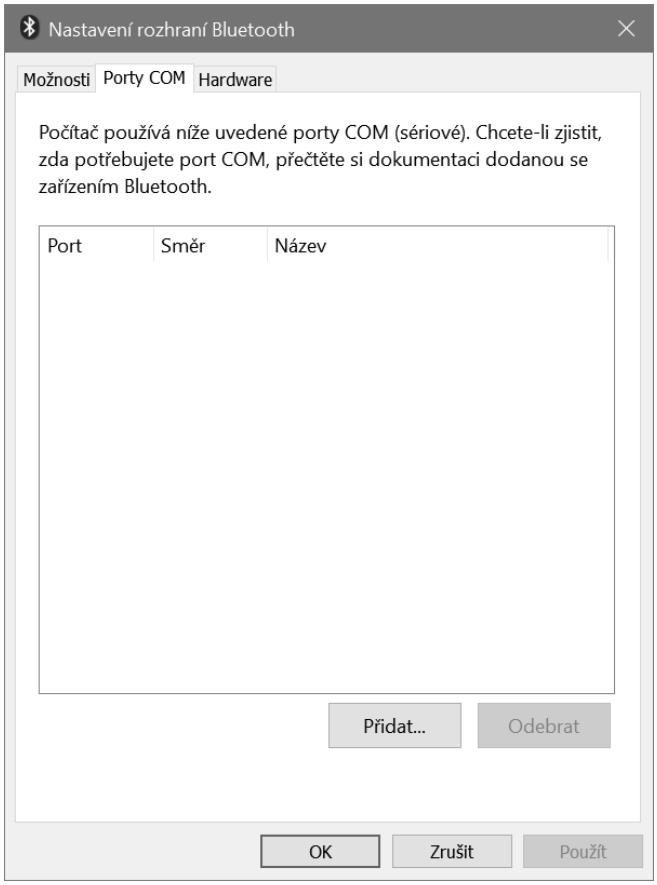
Cílem software je dle zadání práce přijímaná data zpracovat. Smyslem je tedy vytvořit přijímací část komunikačního řetězce, která bude zachytávat surová přijatá data, je zpracovávat a ukládat do paměti počítače.

Snaha o vytvoření robustní aplikace s vlastní analýzou by vzhledem k aplikační jednoúčelovosti postrádala smysl. Samotná data lze vhodněji ve velkých objemech zpracovat v k tomu určených prostředích, jako například současnými tabulkovými procesory, či v pokročilejších prostředích Octave nebo Matlab.

Cíle programu shrnují následující body:

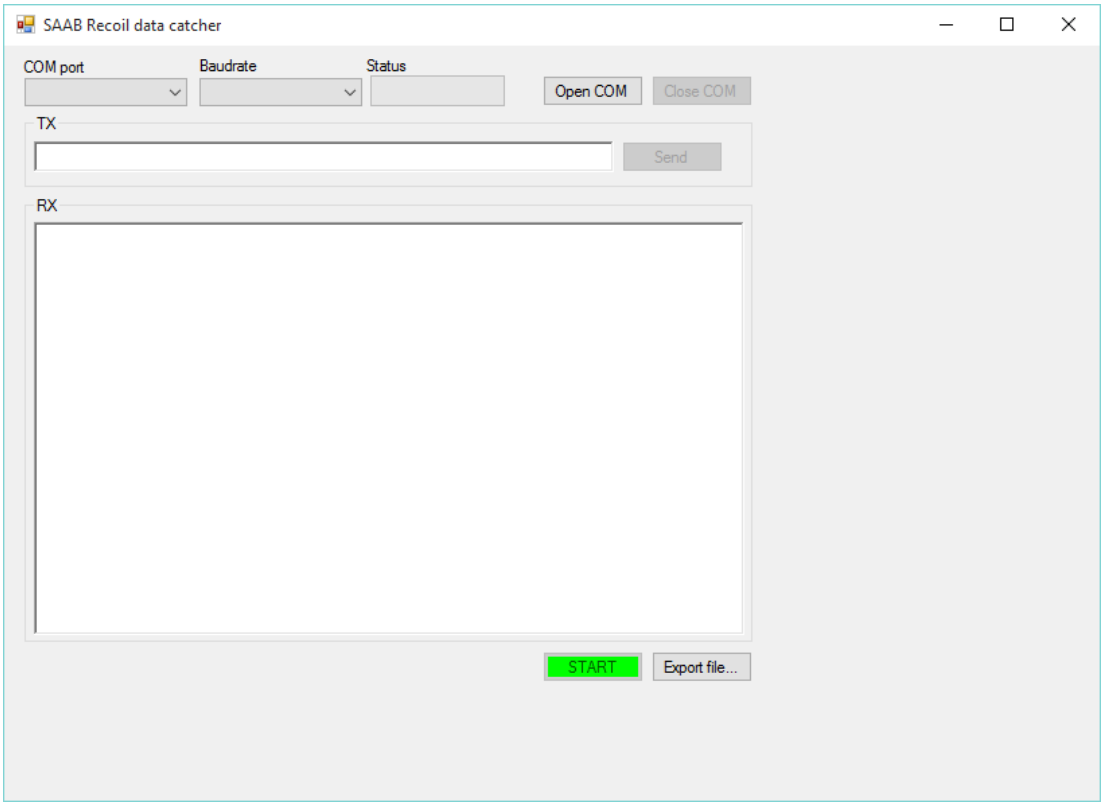
1. Otevřít komunikační port, na němž očekáváme, že je přípravek připojen k počítači.
2. Sběr dat a jejich uložení pro další zpracování.
3. Schopnost spravovat iniciaci a terminaci měření.

Rozhraní aplikace tedy skýtá základní prvky, které tyto body obslouží. Jedná se o výběr komunikačního portu, výběr přenosové rychlosti, tlačítko pro export datového souboru, přepínací tlačítko pro inicializaci spojení, indikační prvek signalizující stav připojení a přepínací tlačítko pro start a stop měření. Bluetooth párování obstará uživatel sám na úrovni zařízení, ke kterému chce přípravek připojit. Není-li provedeno přenastavení, výchozí kód pro párování je 1234. Předpokládá se, že číslo COM portu, na němž je přípravek připraven komunikovat, je známo a bude vybráno v rozhraní aplikace.



Obrázek 26 – snímek obrazovky – kde hledat informaci o příslušných portech COM Windows

Prvním krokem pro obsluhu je tedy volba komunikačního portu, na němž lze očekávat možnost využít Bluetooth rozhraní. Po jeho výběru volíme přenosovou rychlost – byly ponechány dvě rychlosti k výběru, a to 9600 bps pro testování prototypu na nepájivém poli a 115200 bps, tedy výchozí rychlost RN4020. Pak se aktivuje tlačítko pro otevření komunikačního portu do aplikace. Kliknutím se spojení dokončí. Pak již lze získávat data. Proces automaticky zachytává příchozí data, vypisuje je do příslušného textového pole a činí tak do ukončení měření. Získaná data je možné exportovat. Jako výchozí je použit velmi univerzální formát csv (data separovaná oddělovači), ale lze ukládat i jako prostý text. Pro získávání dat je vybaveno rozhraní tlačítkem, ale také je ponechána konzole TX, skrze kterou lze komunikaci v budoucnu případně rozšířit. Přepínací tlačítko inicializace a terminace měření mění svou barvu pro lepší indikaci.



Obrázek 27 – snímek obrazovky – náhled na obslužnou aplikaci

5 PROTOTYPY A JEJICH TESTOVÁNÍ

Kapitola se věnuje všem zapojením vzniklým v průběhu práce na projektu, která měla za cíl otestovat a optimalizovat hardware a postupně budovat a zkoušet rovněž firmware. V průběhu celého akademického roku vzniklo hned několik prototypů. Každý je zde představen a popsán z hlediska funkce a jeho odhalených nedostatků.

5.1 Prvotní verze na nepájivém kontaktním poli

V průběhu návrhu prvního prototypu, obhájeného jako semestrální projekt, byl objednán komerčně dostupný modul s akcelerometrem LIS331, tedy součástky použité i v navrženém zapojení měřicího přípravku, pro využití v testování i mimo účely této práce. (viz 2.2)

Tento modul byl zapojen s klonem Arduino Nano s mikroprocesorem Atmel (toho času, dnes již) ATmega328p na nepájivém kontaktním poli. Na tomto prvotním prototypu byly testovány některé dílčí komunikační mechanismy budoucího firmware. Rozhraním SPI předával senzor data MCU a ten pak odesílal získané hodnoty sériovou komunikací do PC.

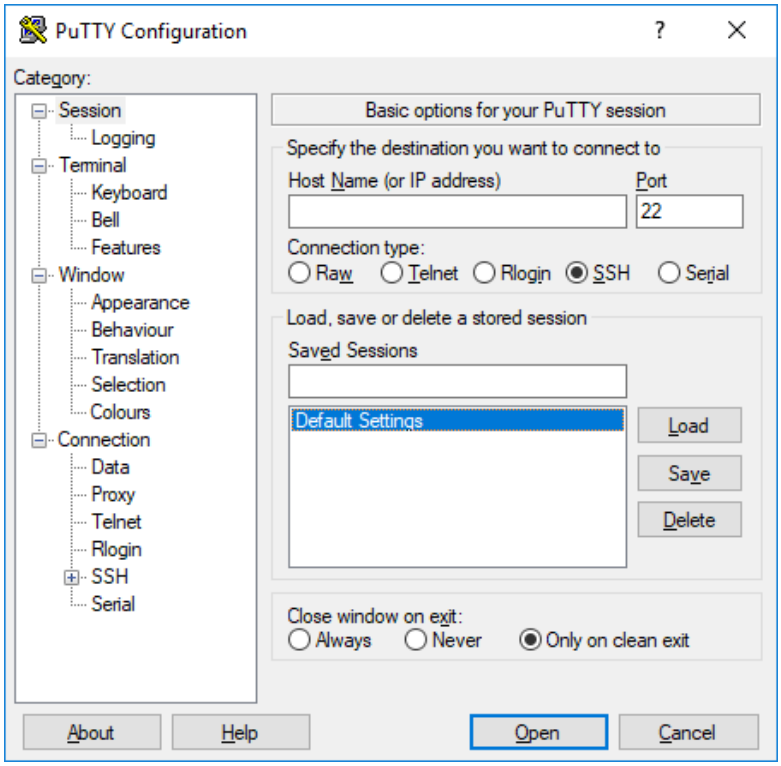
Firmware pro testovací Arduino byl navzdory existenci proprietárního jazyka platformy Arduino psán v jazyce C, a to hlavně s ohledem na pozdější praktické využití některých tímto prototypem ověřených pasáží kódu přímo pro vlastní měřicí přípravek. Pojítkem otestovaných dílčích mechanismů je tedy multiplatformní vývojový základ, který umožnil otestovat alespoň některé komunikační prostředky a také přinesl snazší výchozí bod pro implementaci výsledného systému ještě před dokončením jeho fyzické realizace na desce plošných spojů.

Praktickou zajímavostí je samotný mechanismus samotného programování, přesněji nahrávání samotného již přeloženého souboru formátu *.hex do zařízení s použitím nástroje avrdude. Ten je shodný s metodou použitou v prostředí Arduino IDE, a tak jej lze s výhodou využít a bez nutnosti použití speciálního programátoru či dalších jiných HW nebo SW nástrojů postačí USB kabel jako při běžném programování Arduina.

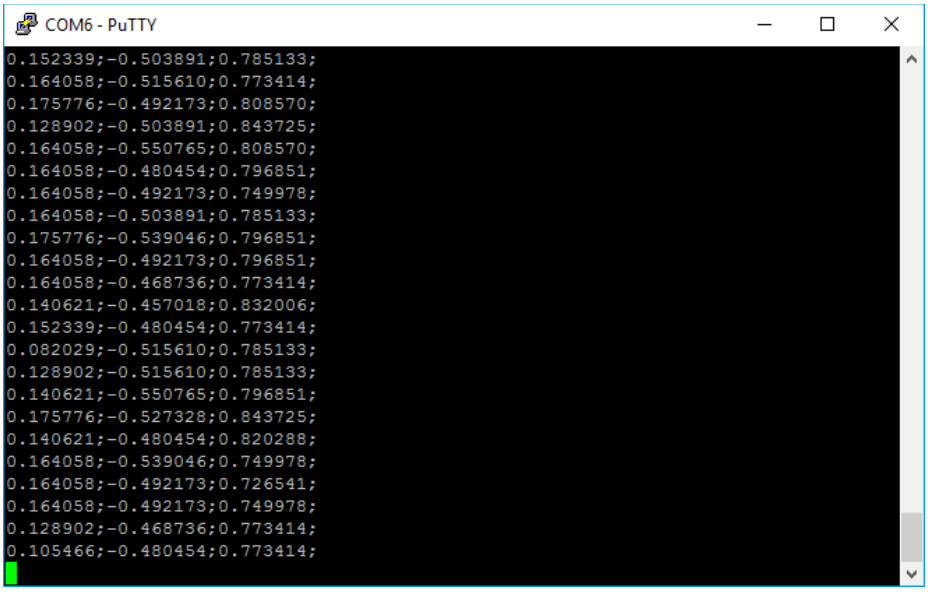
5.1.1 Prototypové čtení dat a prvotní programy

Výše popsaný prvoprototyp komunikuje rovněž sériově na COM portu, tedy lze z něj rovněž sbírat data. Bylo testováno několik způsobů načítání těchto dat.

První detekci obstaral program PuTTY, což je open source volně šiřitelný klient, který lze vhodným nastavením využít i pro sériovou komunikaci na COM portu.[43] Je-li při obrázku uvedeno slovní spojení snímek obrazovky, pak jde o dílo autora, a takový není opatřen odkazem na zdroj.



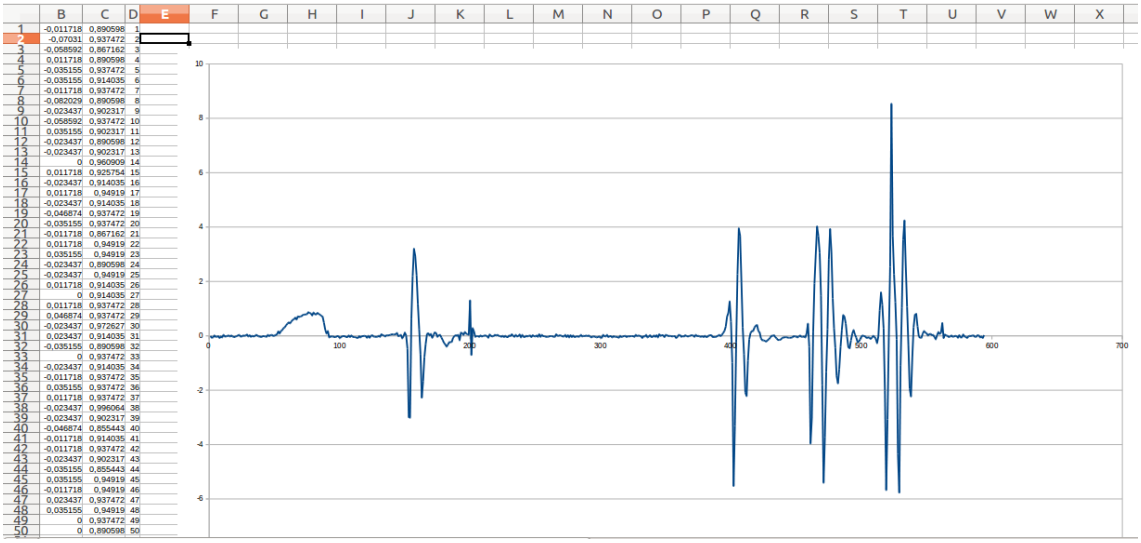
Obrázek 28 – snímek obrazovky – ukázka konfigurace PuTTY pod Microsoft Windows 10



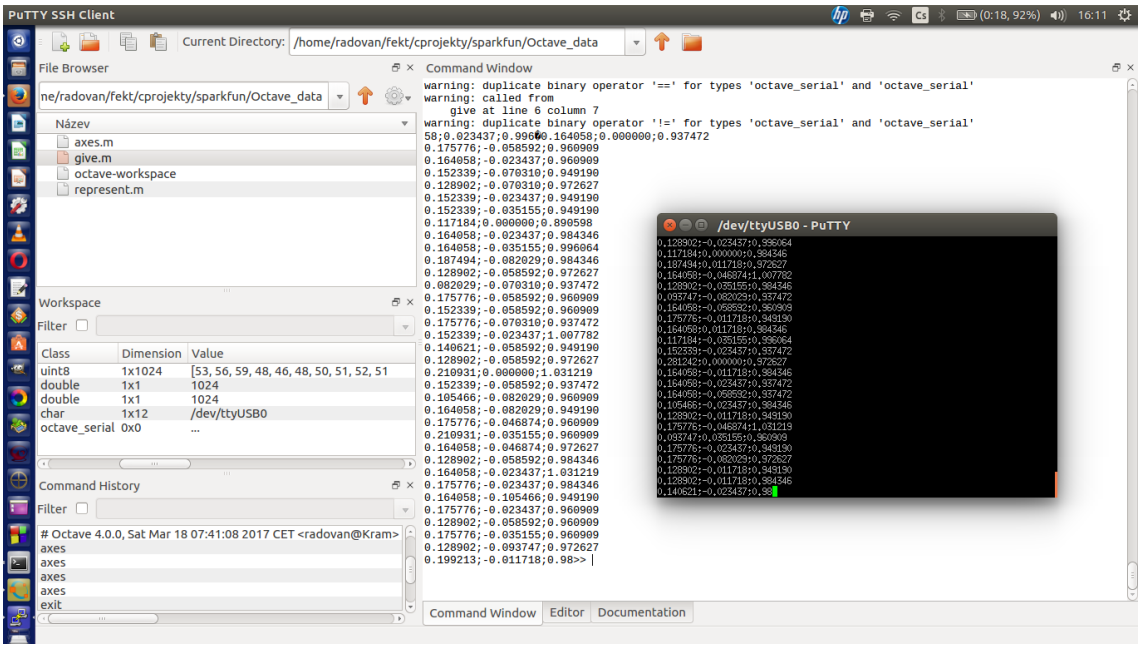
Obrázek 29 – snímek obrazovky – Čtení dat v PuTTY

Kromě zobrazení dat byly provedeny experimenty také se zpracováním dat. Otevřít sériový COM port lze i v programech Matlab (testováno na Windows 10) a Octave (testováno na Ubuntu). Pod Ubuntu vznikl také jednoduchý vlastní autorský autonomní program pro čtení z COM portu a ukládání do formátu csv.

Obrázek 30 níže ukazuje informativně, jak reaguje v čase (osa x) výchylka hodnot zrychlení v násobcích gravitačního zrychlení g= 9,823 $m \cdot s^{-2}$ (osa y).



Obrázek 30 – snímek obrazovky – ukázka surového zpracování dat v LibreOffice Calc
(Nejde interpretaci měřených dat, obrázek má pouze informativní charakter.)



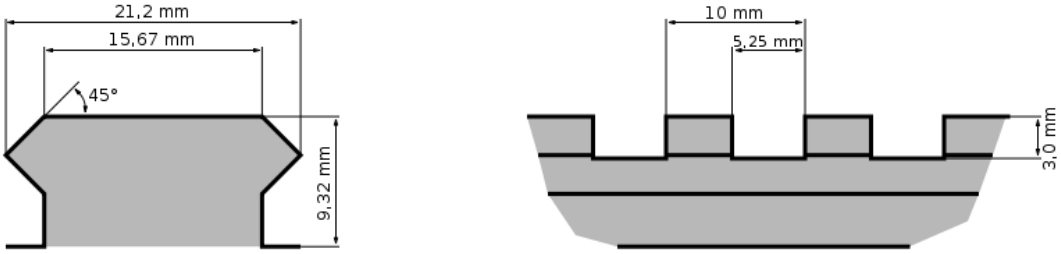
Obrázek 31 – snímek obrazovky – ukázka dvojího přepínaného načítání
(na pozadí Octave, v popředí srovnání s PuTTY)

5.2 První vyrobený prototyp

5.2.1 Vylepšení designu semestrálního projektu

Nový prototyp přípravku vznikl počátkem letního semestru úpravou úspěšně obhájeného návrhu v semestrálním projektu primárně ze dvou důvodů, popsaných v této části.

Prvním důvodem byla nová praktičtější koncepce upevnění přípravku na tělo testované zbraně. Jak ukazuje Obrázek 33 – fotografie – držák s montáží na zbraňovou lištu jedná se v praxi o držák zbraňového příslušenství (svítilny, kolimátoru, optiky…), který má montáž na standardní zbraňovou lištu, velmi rozšířenou u nejrůznějších typů soudobých zbraní, případně je lze přidat na zbraně starší. [31]



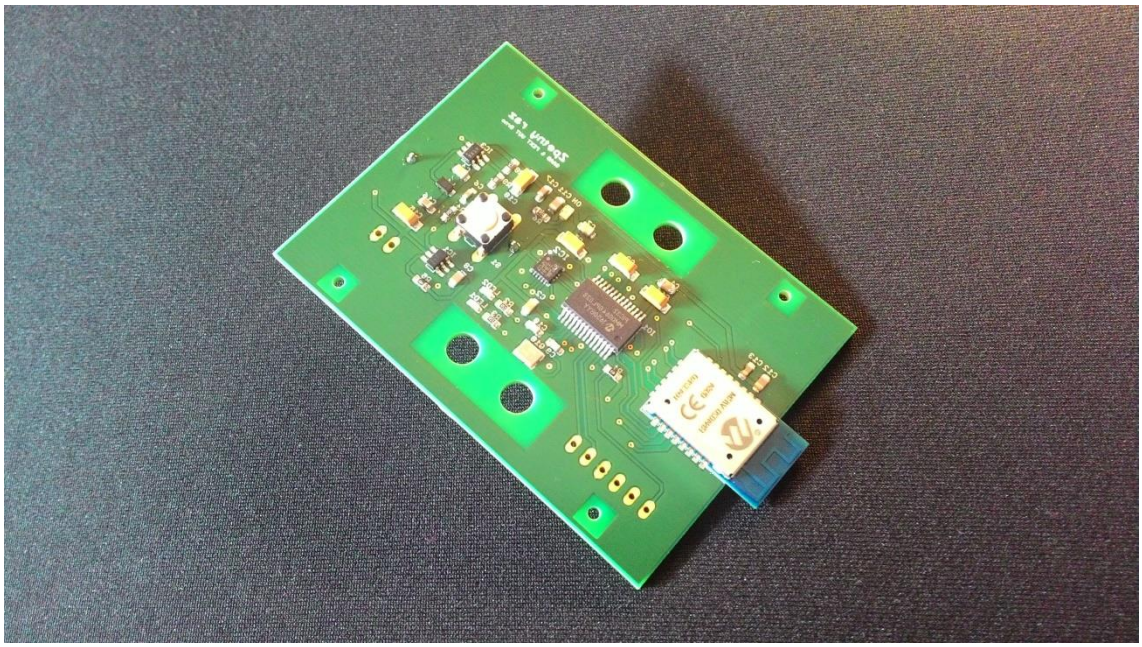
Obrázek 32 – lišta pro montáže příslušenství, zdroj [31]

Tento krok velmi přispěl k praktičnosti přípravku. Návrh desky plošných spojů přípravku byl tedy pozměněn s ohledem na nové rozměrové požadavky, zejména montážní díry pro upevňovací šrouby.

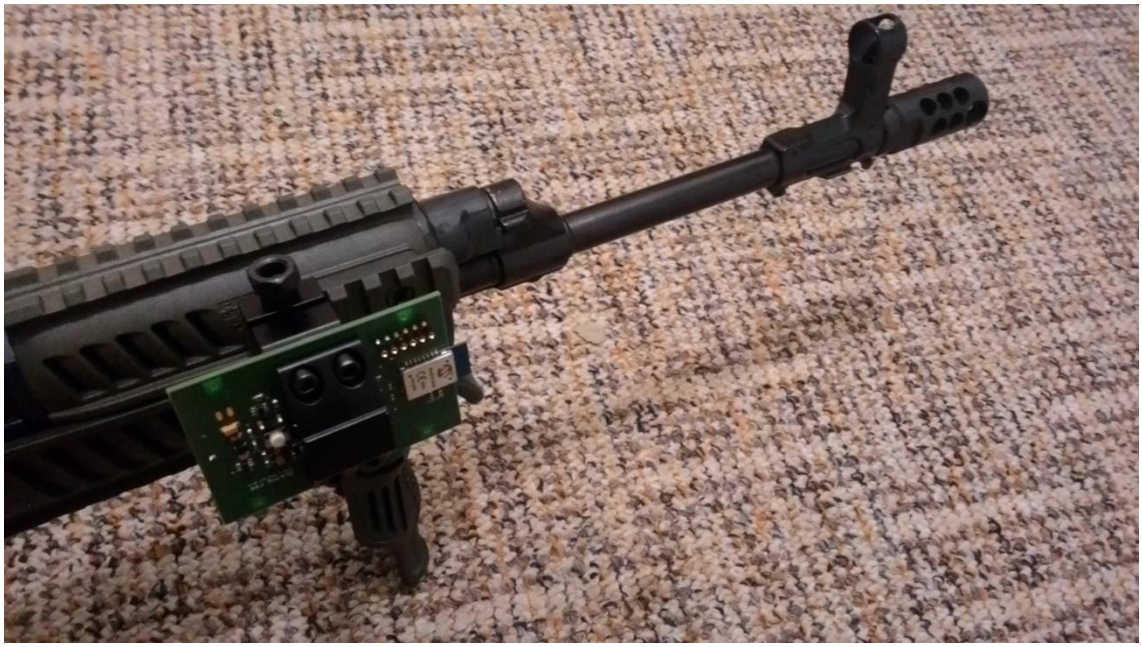
Druhým důvodem úpravy designu hardware navrženého a obhájeného v semestrálním projektu byla dostupnost použitých součástek, kdy bylo nutno přihlédnout k sortimentu dodavatelů společnosti SAAB.

Výsledkem je tedy rozměrově kompaktnější návrh, který rovněž získal lepší možnost praktické aplikace díky standardní montáži. Takto upravená deska byla zadána do výroby. Výsledky ukazují následující obrázky v rámci této podkapitoly. Jakékoliv obrázky v této práci mající v popisu slovo fotografie jsou dílem autora práce (a nejsou tedy analogicky doplněny citací zdroje).

Obrázek 33 – fotografie – držák s montáží na zbraňovou lištu



Obrázek 34 – fotografie – ukázka prvního vyrobeného prototypu



Obrázek 35 – fotografie – přípravek na útočné pušce Samopal vzor 58 v taktické úpravě

Obrázek 36 – fotografie – Sa vz. 58, celkový pohled pro lepší představu rozměrů

5.2.2 Oživení prototypu

Prvotní oživení proběhlo bez účasti Code Configuratoru popsaného v části 4.1.; šlo o postupný manuální proces programování a zkoušení na nízké úrovni.

Před samotným programováním mikrokontroléru byl nejprve napsán definiční soubor, v němž byly definovány názvy pro jeho jednotlivé vstupy a výstupy tak jak jsou fyzicky zapojeny na desce plošných spojů, respektive podle schématu zapojení přípravku. Takový popisný soubor přináší lepší orientaci při psaní kódu, protože kód

zpřehledňuje a činí zřejmějším z hlediska jeho účelu (funkce). Také je tímto způsobem zajištěna určitá úroveň multiplatformního použití vytvořeného kódu, protože kód obsahuje pouze obecné konstanty, konkretizované až definováním v externím souboru knihovny, například s ohledem na pozdější verze.

V prvním kroku byly s využitím vytvořené knihovny nejprve testovány dvě svíticí diody LED1 a LED2, které slouží výhradně jako kontrolní signalizační výstupy. Úspěšným rozsvícením obou diod se ověřila funkčnost programovacího nástrojového řetězce od PC až k MCU, tedy že program byl úspěšně nahrán. Těchto diod je možné využít univerzálně prostým přiřazením významu ať ve finální aplikaci, či při ladění firmware při jeho vývoji.

Dalšími důležitými kroky je navázání komunikace mezi MCU a periferiemi pro ověření jejich funkčnosti. Nejprve přichází v úvahu Bluetooth modul, aby byla zabezpečena komunikace přípravku s počítačem. Modul RN4020 má kromě svého katalogového listu [21] speciální uživatelskou příručku pro konfiguraci a ovládání pomocí příkazů. [20] Dodržením postupu popsaného tamtéž se podařilo modul uvést do továrního nastavení a následně do tzv. Command módu, kdy je modul připraven přijímat konfigurační příkazy. Komunikace UART byla odposlouchávána převodníkem, který soužil i jako zdroj 3V napájení.

Obrázek 37 – převodník USB TTL UART, převzato z [32]

Zde se odhalil poučný nedostatek v návrhu testovacího prototypu – přístupnější

pro ladění a odposlech komunikace by bylo ponechat v cestě UART signálům RX a TX například piny pro zkratovací propojky (jumpery), k nimž by se připojil pomocný převodník nebo například osciloskop snáze než k prokovům na DPS.

5.2.3 Konec prvního prototypu

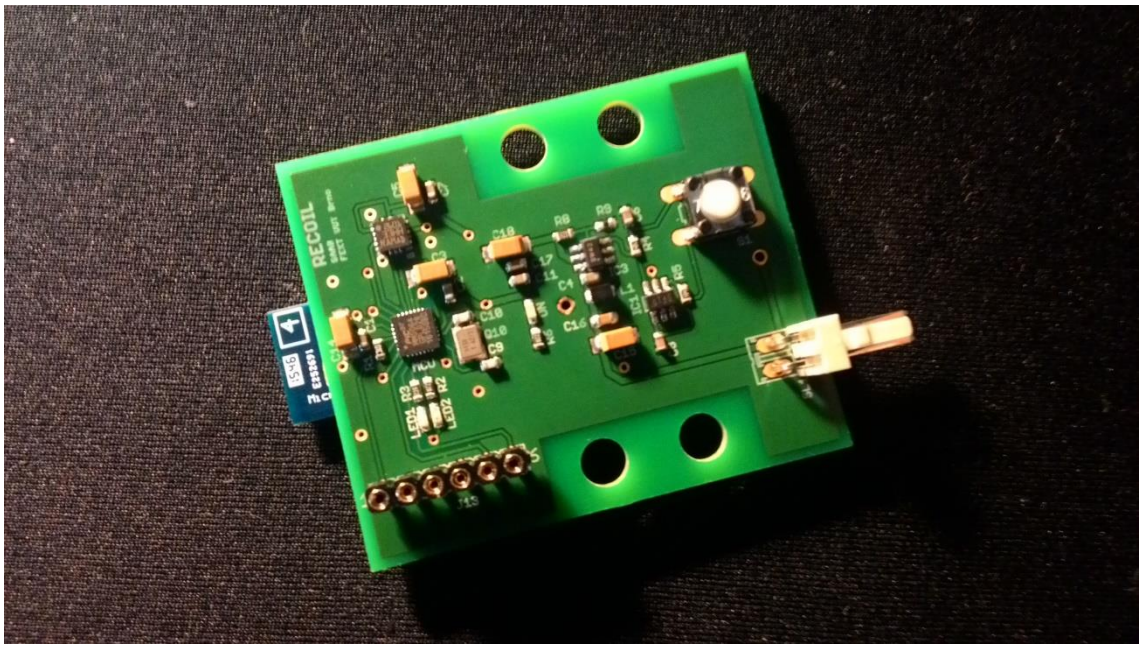
Během oživování a programování prototypu byl již ve výrobě finální výrobek, který popisuje část 5.3. To naštěstí poskytlo rezervní řešení například v případě poškození prototypu.

K poškození prototypu také přeci jen došlo, a tak byl vývoj firmware i software na dobu nezbytně nutnou pozastaven v oblasti praktického testování a přesunul se do teoretické roviny příprav a rozboru plánovaných postupů k finalizaci tohoto řídicího firmware a obslužného software. Toto značně pozdrželo časový plán práce na letní semestr, a proto bylo nezbytně nutné se pro dodržení termínu odevzdání práce uchýlit k upuštění od některých původních zamýšlených funkcionalit a zaměření se pouze na dodržení minimálního rozsahu zadání.

Upuštění od původních ambicí projektu však nakonec dosáhlo svého výsledku a přípravek v zeštíhlené podobě pracuje a je možné jej plynule programovat, využívat jeho možností a rozšiřovat dále jeho funkcionalitu laděním programového vybavení. Tak došlo ve zbývajícím krátkém čase k nalezení optimální rovnováhy mezi uvedením přípravku do provozuschopného stavu a termínem odevzdání práce.

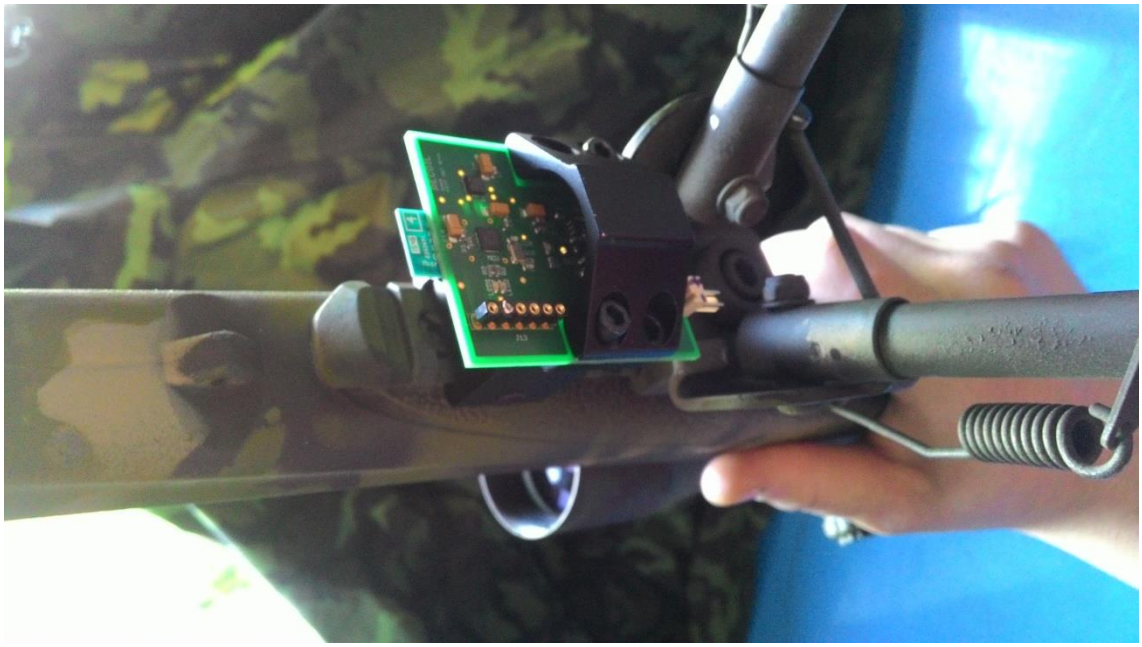
5.3 Finální návrh

Jedním z bodů vytyčených v závěru semestrální práce pro definitivní fázi vývoje přípravku byla snaha směřovat k další miniaturizaci zařízení. V průběhu testování vznikly nové situace, zjištění drobných návrhových nedostatků a došlo k eliminaci přebytečných a chybných signálových spojů. Bez ohledu na poškození prvního prototypu, spolu s odstraněním jeho zmíněných nedostatků a dalším cílením na malé rozměry byla již během odhalení prvních chyb prototypu vyvinuta finální deska a zadána do výroby. Tu ukazují následující fotografie jak v celkovém pohledu, tak v aplikaci, tedy v montáži na různých zbraních.



Obrázek 38 – fotografie – finální výrobek

Obrázek 39 – fotografie – přípravek v montáži na liště zbraně Remington 783



Obrázek 40 – fotografie – uchycení z jiného úhlu

Obrázek 41 – fotografie – přípravek na Samopalu Vzor 58

5.3.1 Novinky a změny oproti prototypu

Mimo opravení chyby v rozhraní SPI, kde jeden ze signálů ležel mimo přemapovatelné piny MCU doznal finální výrobek mnohá vylepšení a zjednodušení, jež jsou popsány v následujících odstavcích.

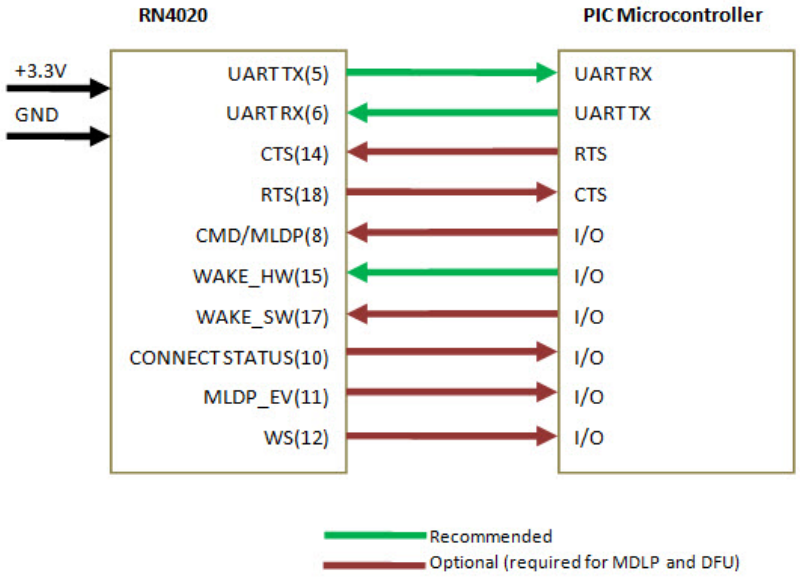
Hlavním cílem této optimalizace bylo osazení 28pinového uQFN pouzdra MCU o velikosti 4x4 mm, a to právě pro jeho velmi malé rozměry. Toto nové pouzdro nejen pomohlo miniaturizovat přípravek, ale stalo se i zdrojem poučení při správném návrhu desky plošných spojů pro tak malé součástky v tak jemné konstrukční třídě. Zapojení nutných podpůrných součástek (blokování napájení,…) zůstalo nezměněno.

Obrázek 42 – Mikrokotrolér PIC32MM0064GPL028, pouzdro uQFN, převzato z [7].

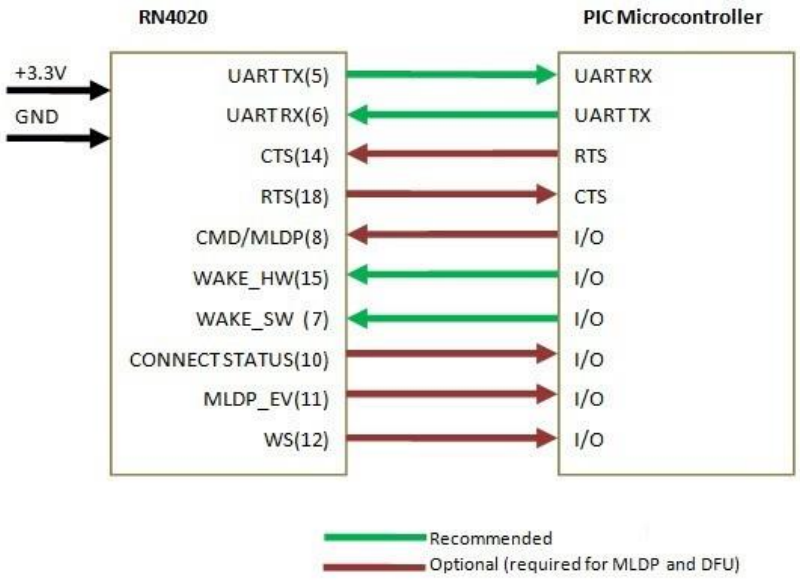
Rovněž byl Bluetooth modul byl zapojen podle katalogových listů tak, aby byl pouze v minimální konfiguraci nutné pro správnou funkci. To přineslo během úprav praktickou situaci a z ní plynoucí cennou zkušenost – výrobce v průběhu času aktualizuje katalogové listy (nejen RN4020) a jak ukazuje Obrázek 43 – Rozhraní PIC mikrokontroléru a modulu RN420, převzato ze starší verze [21], respektive další v pořadí po něm, je vidět, že mezi požadovanými signály přibyl rovněž signál

WAKE_SW, na který původní katalogový list poukazoval pouze jako na volitelný, nikoli povinný. Vzhledem k jeho praktické funkci byl ale vybrán podle informací uvedených jinde v zmíněném katalogovém listu jako nedílná součást i na prvním prototypu, a tak naštěstí zůstal i ve finální verzi zachován.

Na takové úpravy si výrobce vyhrazuje právo, avšak i přesto jde o praktickou ukázku nutnosti adekvátního kritického přístupu při posuzování jakýchkoliv zdrojů informací i při následné aplikaci takto získaných poznatků, a to v nejen v technické praxi.



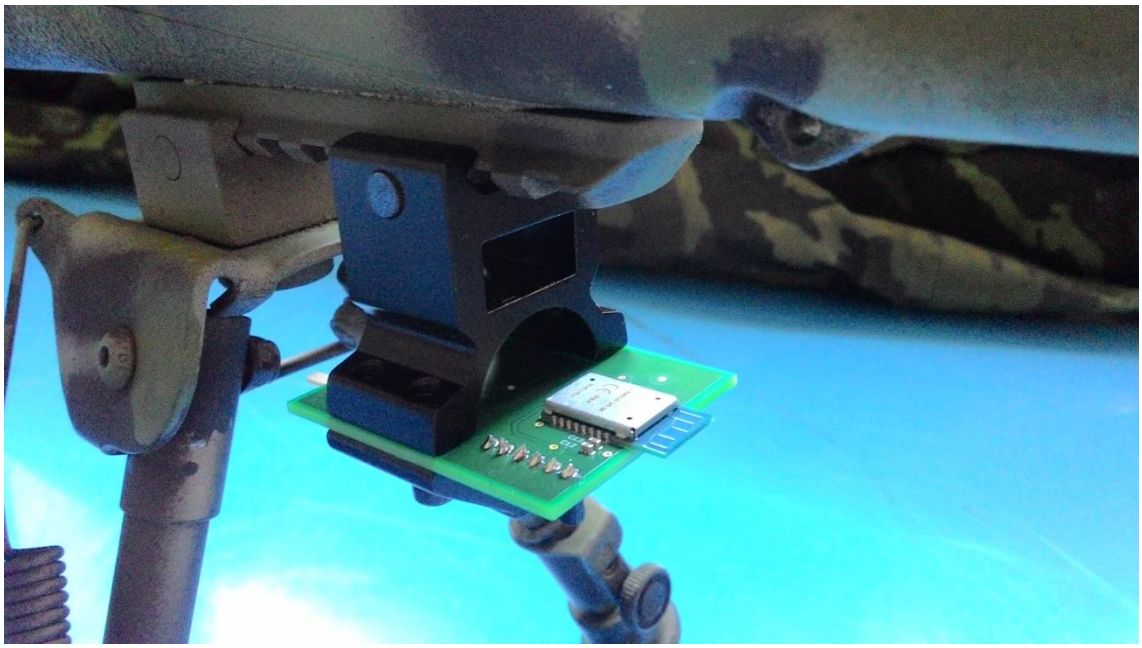
Obrázek 43 – Rozhraní PIC mikrokontroléru a modulu RN420, převzato ze starší verze [21]



Obrázek 44 – Aktualizované požadavky na nutné minimální rozhraní PIC-RN4020 [21]

Na uvedené dvojici obrázků je vidět veškeré použitelné signály na rozhraní mikrokontroléru a modulu. Zeleně vyznačené signály jsou požadovány, červené jsou volitelné. Jak popisuje výrobce v katalogovém listu, minimální rozhraní se sestává z UART a signálů, WAKE_HW, WAKE_SW. Toto umožňuje mikrokontroléru komunikovat s RN4020 modulem za použití ASCII Command API, které je detailně dokumentované ve zvláštní příručce. [20]

Došlo také k lepšímu využití plochy na desce plošných spojů. Mimo osazení menších pouzder součástek byl Bluetooth modul přemístěn do spodní části a součástky více koncertovány blíže k sobě. Zachován byl nutný rozměr pro montáž a případný držák baterie.

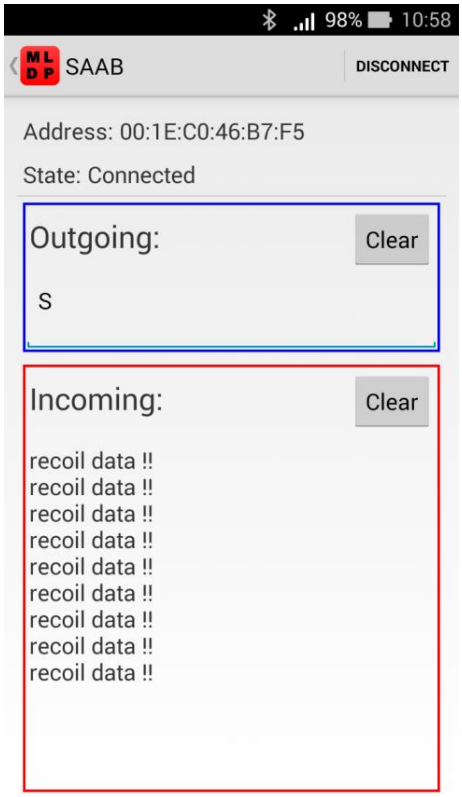


Obrázek 45 – fotografie – detail na Bluetooth modul RN4020

5.4 Získávání výsledků

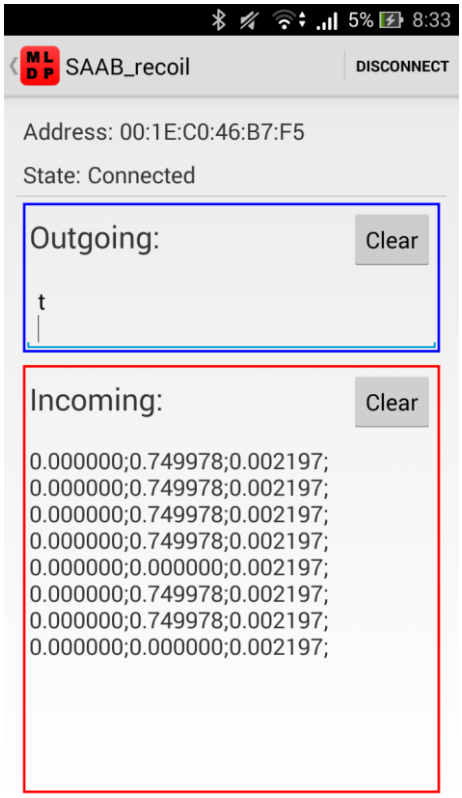
Microchip má velmi silnou základnu pro podporu vývoje i vývojářů, a tak je dostupná na jeho webových stránkách přímo mobilní aplikace pro chytré telefony s OS Android, která slouží jako komunikační terminál pro Bluetooth zařízení. [36] Testování bylo provedeno na telefonu Asus Zenfone – podmínkou je zde podpora verze Bluetooth 4.1 standardu, protože na něm RN4020 pracuje.

Po spárování telefonu a přípravku začala přicházet testovací zpráva vysílaná přípravkem, kdy v tomto případě každou sekundu MCU zapsal na vysílací linku UART řetězec *„recoil data !!“*, terminovaný ASCII znaky CR a LF pro konec řádku a nový řádek, a rovněž se správně prokázal pod nastaveným jménem *„SAAB“*.

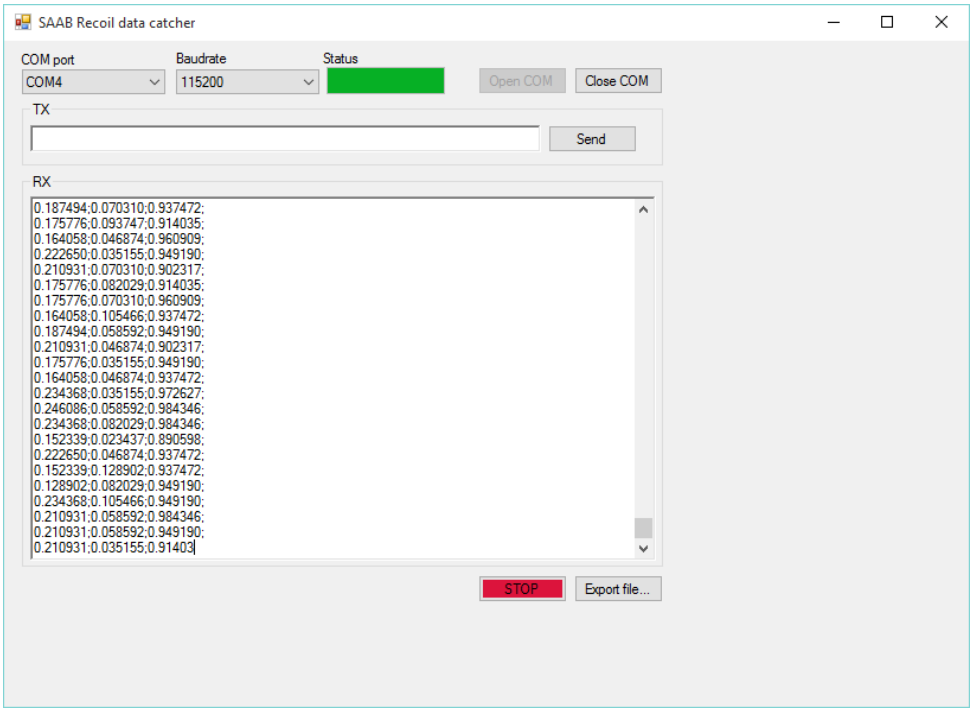


Obrázek 46 – snímek obrazovky – data přijatá na mobilním telefonu po konfiguraci RN4020

Toto se stalo zlomovým bodem ve finalizaci požadavků zadání, protože tak byla ověřena schopnost komunikace přípravku s jeho okolím. Na místo statického testovacího řetězce byl přesměrován výpis vyčtených hodnot z registrů LIS331 a přípravek byl připraven zásobovat spojené zařízení daty o zrychlení, jak ukazuje například Obrázek 47, kde vidíme data v mobilní konzoli Microchipu, anebo následující Obrázek 48 ve vlastní aplikaci. Vzhledem k situaci popsané v kapitole 5.2.3 jde pouze o modelové ukázky.



Obrázek 47 – snímek obrazovky – ukázka přenosu dat, postupně osa x; y; z; akceleromteru



Obrázek 48 – snímek obrazovky – ukázka, jak mohou vypadat přijímaná data na COM portu

6 ZÁVĚR

Úkolem bakalářské práce bylo navrhnout přípravek pro měření zpětného rázu, vyvinout pro něj firmware a také software pro sběr dat, a na závěr ověřit funkčnost celého systému.

Pro úspěšný návrh celé práce od prototypu k finální verzi produktu bylo nutné se nejprve seznámit s dostupnými prostředky realizace, ať už byly doporučeny firmou SAAB, anebo samostatně vyhledány a analyzovány vzhledem k jejich účelu použití. Těchto shromážděných poznatků bylo následně využito při návrhu zapojení a následném návrhu desky plošných spojů, v rámci všech verzí prototypů. Veškeré součástky byly vybírány s důrazem na minimalizaci spotřeby zařízení a i jejich zapojení je navrženo s tímto záměrem.

Výsledný návrh je založen na mikrokontroléru z rodiny PIC32MM od firmy Microchip. K tomuto logickému jádru jsou připojeny nezbytné periferie. Měřicí část obstarává akcelerometr LIS331 od STMicroelectronics, komunikující s MCU přes rozhraní SPI. Komunikační člen pro výměnu dat mezi přípravkem a počítačem zastupuje modul Microchip RN4020, s nímž MCU komunikuje pomocí rozhraní UART a odesílá skrze něj rovněž data. Napájení obstarává zvyšující měnič, napájený buď 3V baterií, nebo v případě delšího statického provozu je možné připojit externí 3V zdroj.

Desky plošných spojů vznikly v návaznosti na provázání jednotlivých periferií ve schématu zapojení, a také se základní myšlenkou řídicího programového vybavení, ladění, testování a obsluhy přístroje. Šlo o prototypy přístroje, které byly podle návrhu popsaného v této práci vyvíjeny a testovány.

Testování prvotní verze produktu přineslo výchozí body pro další vývojové iterace, které konvergovaly k optimalizaci a miniaturizaci ve všech směrech od fyzických rozměrů přes programové vybavení až k finální podobě produktu. Ten je ve výsledku kompaktnější než původní návrh a svých vytyčených optimalizačních cílů dosáhl, a to i přes komplikace během jeho vývoje, jež tato práce také popisuje.

LITERATURA

[1] Zákon zachování hybnosti. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-05-28]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Z%C3%A1kon_zachov%C3%A1n%C3%AD_hybnosti

[2] CATSOULIS, John. Designing embedded hardware. 2nd ed. Sebastopol, CA: O'Reilly, c2005. ISBN 0596007558.

[3] MICROCHIP.*: PIC32MM Family of Low Power, Low Cost, 32-bit Microcontrollers* [online]. [cit. 2016-12-01]. Dostupné z: https://www.microchip.com/promo/pic32mm/

[4] MICROCHIP.*: PIC32MM0064GPL028* [online]. [cit. 2016-12-01]. Dostupné z: http://www.microchip.com/wwwproducts/en/PIC32MM0064GPL028

[5] MICROCHIP.*: PIC32MM0064GPL036 FAMILY* [online]. [cit. 2016-12-01]. Dostupné z: http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/60001324b.pdf

[6] PIC32MM0064GPL028-SSOP-28. Microchip.com [online]. [cit. 2016-12-13]. Dostupné z: http://www.microchip.com/_images/ics/medium-PIC32MM0064GPL028-SSOP-28.png

[7] PIC32MM0064GPL028-QFN-28. Microchip.com [online]. [cit. 2016-12-13]. Dostupné z: http://www.microchip.com/_images/ics/medium-PIC32MM0064GPL028-QFN-28.png

[8] Modul LIS331. Robotshop.com [online]. [cit. 2016-12-13]. Dostupné z: http://www.robotshop.com/media/catalog/product/cache/15/image/800x800/9df78eab33525d08d6e5fb8d27136e95/t/r/triple-axis-accelerometer-lis331.jpg

[9] Modul MP6050. Playground.arduino.cc [online]. [cit. 2016-12-13]. Dostupné z: http://playground.arduino.cc/uploads/Main/mpu-6050.jpg

[10] Logo Bluetooth. Wikipedia [online]. [cit. 2016-12-13]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Bluetooth#/media/File:Bluetooth.svg

[11] Původ loga Bluetooth. 9inchmarketing.com [online]. [cit. 2016-12-13]. Dostupné z: http://www.9inchmarketing.com/wp-content/uploads/2016/02/origin-of-blue.jpg

[12] Logo Bluetooth Smart. Wikipedia, the free encyclopedia [online]. [cit. 2016-12-13]. Dostupné z:https://en.wikipedia.org/wiki/Bluetooth_low_energy#/media/File:Bluetooth_Smart_Logo.svg

[13] HC05 [online]. [cit. 2016-12-13]. Dostupné z: http://www.elecfreaks.com/store/images/product_images/bluetooth-HC05-01.jpg

[14] RN4020 [online]. [cit. 2016-12-13]. Dostupné z: http://www.microchip.com/_images/ics/medium-RN4020-MODULE-22.png

[15] CR2032 [online]. [cit. 2016-12-13]. Dostupné z: http://www.onlybatteries.com/webimages/images/19548.jpg

[16] Crystal unit.*: TSX-3225* [online]. [cit. 2016-12-01]. Dostupné z: http://www.farnell.com/datasheets/526621.pdf

[17] STMicroelectronics.*: LIS331DLH* [online]. [cit. 2016-12-01]. Dostupné z: www.st.com/resource/en/datasheet/lis331dlh.pdf

[18] MICROCHIP.*: MCP1640* [online]. [cit. 2016-12-01]. Dostupné z: http://www.microchip.com/wwwproducts/en/en547080

[19] TEXAS INSTRUMENTS.*: SN74LVC2G14 Dual Schmitt-Trigger Inverter* [online]. [cit. 2016-12-01]. Dostupné z: http://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn74lvc2g14.pdf

[20] MICROCHIP.*: RN4020 Bluetooth® Low Energy Module User's Guide* [online]. [cit. 2016-12-01]. Dostupné z: http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/70005191A%20(1).pdf

[21] MICROCHIP.: *Bluetooth® Low Energy Module* [online]. [cit. 2016-12-01]. Dostupné z: http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/50002279A.pdf

[22] Bluetooth: *Wikipedie* [online]. [cit. 2016-12-01]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Bluetooth

[23] Bluetooth low energy: *Wikipedia, the free encyclopedia* [online]. [cit. 2016-12-01]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Bluetooth_low_energy

[24] PANDATRON.: Jednotlačítkové ovládání. *Pandatron* [online]. [cit. 2016-12-07]. Dostupné z: http://pandatron.cz/?515&jednotlacitkove_ovladani

[25] VŠB Technická univerzita Ostrava.: Prostředky automatického řízení. *Překlad - Akcelerometry*[online]. [cit. 2016-12-07]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~jur286/prostredky_aut_rizeni/preklad.htm

[26] ŠTURSA, P.: Balistika a konstrukce hlavních dílů zbraní (pro 2. ročník předmětu SZb). [cit. 2016-12-07]. Dostupné z: výukový materiál COPt Uherský Brod

[27] SN74LVC2G14 Dual Schmitt-Trigger Inverter [online]. [cit. 2016-12-14]. Dostupné z: http://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn74lvc2g14.pdf

[28] VOJÁČEK, A.:Jak pracují nové 3D MEMS akcelerometry Freescale ? [online]. [cit. 2016-12-14]. Dostupné z: http://vyvoj.hw.cz/soucastky/jak-pracuji-nove-3d-mems-akcelerometry-freescale.html

[29] Wikipedia: MEMS. Wikipedia [online]. [cit. 2016-12-14]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/MEMS

[30] PuTTY: a free SSH and telnet client for Windows [online]. [cit. 2017-05-03]. Dostupné z: http://www.putty.org/

[31] Picatinny rail. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-05-04]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Picatinny_rail

[32] Laskarduino.cz [online]. [cit. 2017-05-04]. Dostupné z: www.laskarduino.cz

[33] Ring buffer. *Embedded.com* [online]. [cit. 2017-05-06]. Dostupné z: http://www.embedded.com/electronics-blogs/embedded-round-table/4419407/The-ring-buffer

[34] *Karlsson Robotics: Triple Axis Accelerometer - LIS331HH* [online]. [cit. 2017-05-28]. Dostupné z: http://www.kr4.us/triple-axis-accelerometer-lis331hh.html

[35] GRIFFITHS, Ian, Jon FLANDERS a Chris. SELLS. *Mastering Visual studio .NET*. Beijing: O'Reilly, 2003. ISBN 0-596-00360-9.

[36] *RN4020 Bluetooth Low Energy PICtail/PICtail Plus: MLDP Demo for Android* [online]. [cit. 2017-05-29]. Dostupné z: http://www.microchip.com/DevelopmentTools/ProductDetails.aspx?PartNO=rn-4020-pictail

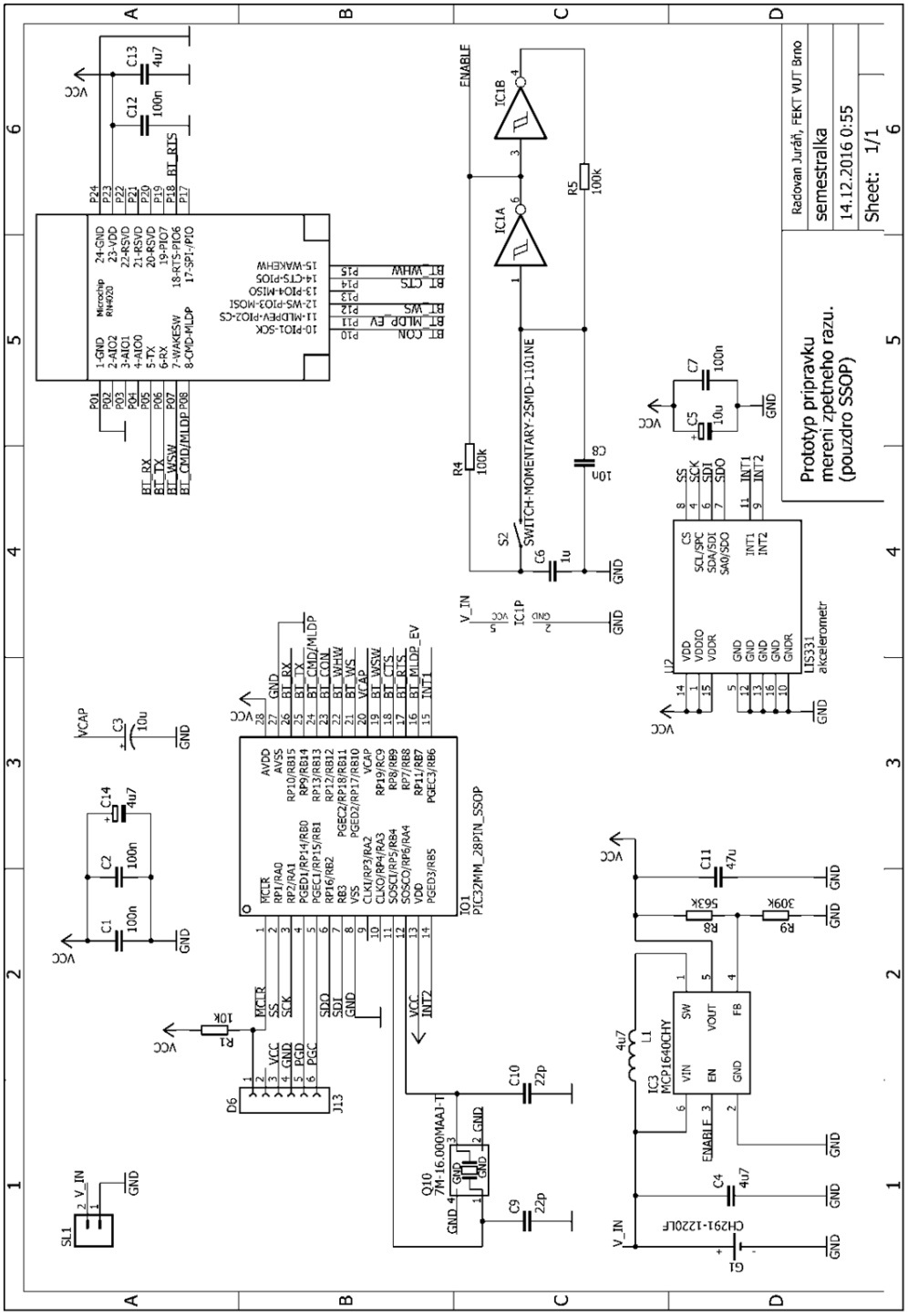
[37] Operační systém reálného času. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-05-29]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Opera%C4%8Dn%C3%AD_syst%C3%A9m_re%C3%A1ln%C3%A9ho_%C4%8Dasu

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

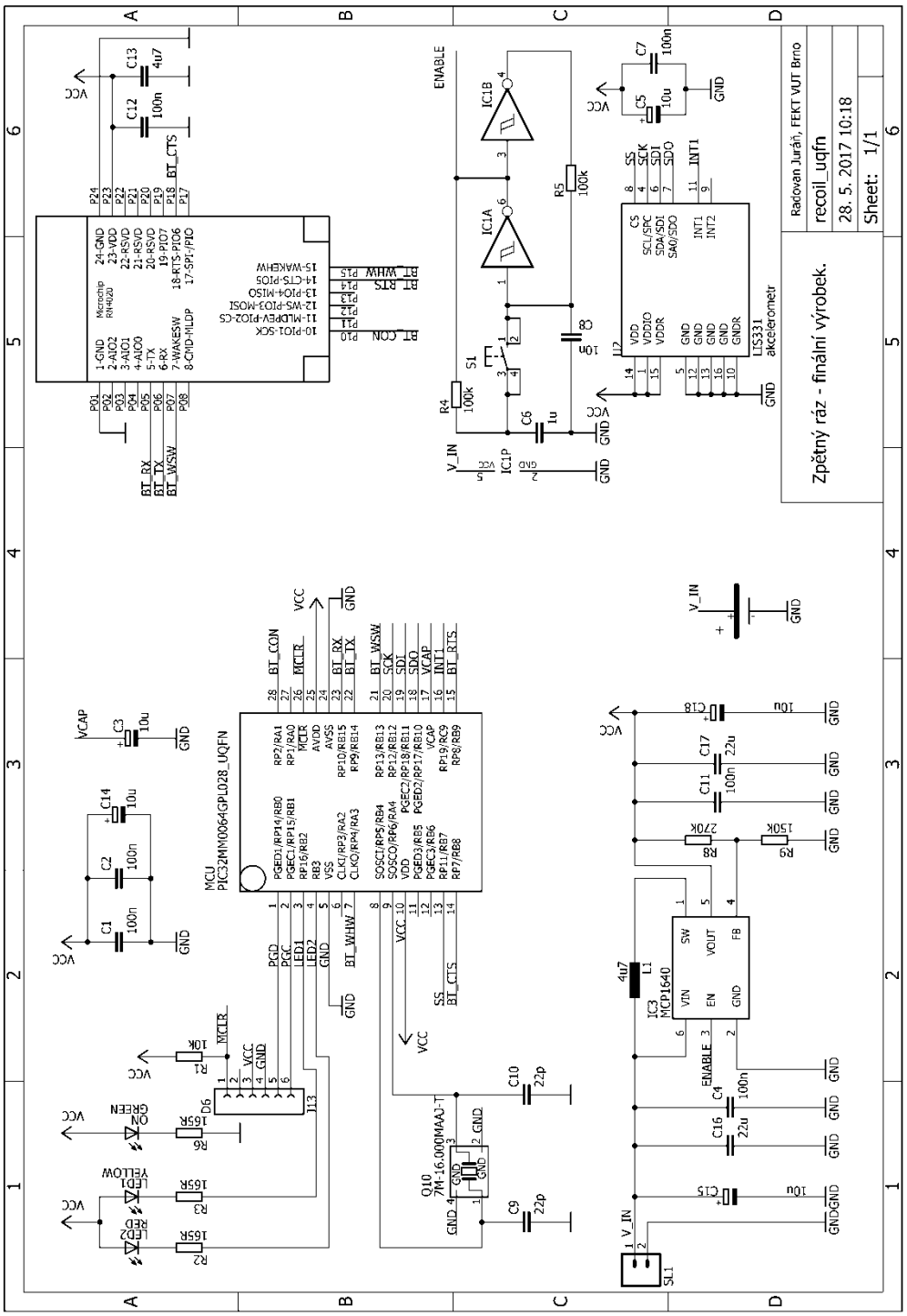
DPS	Deska plošných spojů
SMD	Surface mount device, součástka/zařízení pro povrchovou montáž
MCU	Mikrokontrolér
HW	Hardware
SW	Software

A SCHÉMATA ZAPOJENÍ

A.1 Původní obvodové zapojení prototypu



A.2 Obvodové zapojení finální verze



B VÝROBNÍ PODKLADY

Výrobní podklady pro desku plošných spojů by v tištěném textu postrádaly smysl, a proto jsou součástí povinné elektronické přílohy práce – jedná se o soubory návrhového editoru Autodesk Eagle. Zapojení dokumentuje příloha A.2.

C SEZNAM SOUČÁSTEK

C.1 Seznam součástek k prototypu ze semestrálního projektu

Tabulka 2 – Tabulka materiálů

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
C1	100n	C0603	Keramický kondenzátor
C2	100n	C0603	Keramický kondenzátor
C3	10u	CT3528	Tantalový kondenzátor
C4	4u7	C0603	Keramický kondenzátor
C5	10u	PANASONIC_A	Elektrolytický konenzátor
C6	1u	C0603	Keramický kondenzátor
C7	100n	C0603	Keramický kondenzátor
C8	10n	C0603	Keramický kondenzátor
C9	22p	C0603	Keramický kondenzátor
C10	22p	C0603	Keramický kondenzátor
C11	47u	C0603	Keramický kondenzátor
C12	100n	C0603	Keramický kondenzátor
C13	4u7	C0603	Keramický kondenzátor
C14	4u7	PANASONIC_A	Elektrolytický konenzátor
G1	CH291-1220LF	CH291-1220LF	SMD držák baterie
IC1	SN74LVC2G14DBVT	SOT23-6	Dvojti Schmidtův invertor
IC3	MCP1640CHY	SOT23-6	DCDC zvyšující měnič
IO1	PIC32MM_28PIN_SSOP	SSOP28	Mikrokontrolér
J13	D6	SIL06	Šestice pinů
L1	4u7	L1812	Induktor
Q10	7M-16.000MAAJ-T	TSX-3225	Krystalový oscilátor
R1	10k	R0603	Rezistor
R4	100k	R0603	Rezistor
R5	100k	R0603	Rezistor
R8	563k	R0603	Rezistor
R9	309k	R0603	Rezistor
S2	SWITCH-MOMENTARY-2SMD-1101NE	TACTILE-SWITCH-1101NE	Tlačítko
SL1		02P	Dvojice pinů
U$1	RN4020	RN4020SMD	Bluetooth modul
U2	LIS331	LGA16-3MM	Akcelerometr

C.2 Seznam součástek pro finální výrobek

Tabulka 3 – Tabulka materiálů finální verze

Součástka	Hodnota	Pouzdro	Popis
C1	100 nF	C0603	keramický kondenzátor
C2	100 nF	C0603	keramický kondenzátor
C3	10 uF	A/3216-18R	tantalový kondenzátor
C4	100 nF	C0603	keramický kondenzátor
C5	10 uF	A/3216-18R	tantalový kondenzátor
C6	1 uF	C0603	keramický kondenzátor
C7	100 nF	C0603	keramický kondenzátor
C8	10 nF	C0603	keramický kondenzátor
C9	22 pF	C0603	keramický kondenzátor
C10	22 pF	C0603	keramický kondenzátor
C11	100 nF	C0603	keramický kondenzátor
C12	100 nF	C0603	keramický kondenzátor
C13	4,7 uF	C0603	keramický kondenzátor
C14	10 uF	A/3216-18R	tantalový kondenzátor
C15	10 uF	A/3216-18R	tantalový kondenzátor
C16	22 uF	C0603	keramický kondenzátor
C17	22 uF	C0603	keramický kondenzátor
C18	10 uF	A/3216-18R	tantalový kondenzátor
IC1	-	SOT23-6	Schmittův klopný obvod
IC3	typ B s TrueDisconnect	SOT23-6	zvyšující měnič
J13	-	SIL06	konektor ICSP
L1	4,7 uH	L2012C	induktor
LED1	žlutá	CHIPLED_0603	LED
LED2	červená	CHIPLED_0603	LED
MCU	PIC32MM0064GPL028	uQFN28	mikrokontrolér
ON	zelená	CHIPLED_0603	LED
Q10	7M-16.000MAAJ-T	TSX-3225	krystalový oscilátor
R1	10 kΩ	R0603	rezistor
R2	165 Ω	R0603	rezistor
R3	165 Ω	R0603	rezistor
R4	100 kΩ	R0603	rezistor
R5	100 kΩ	R0603	rezistor
R6	165 Ω	R0603	rezistor
R8	270 kΩ	R0603	rezistor
R9	150 kΩ	R0603	rezistor
S1	-	B3F-10XX	tlačítko
SL1	-	02P	napájecí konektor
u$1	RN4020	RN4020SMD	Bluetooth modul
u$2	-	KEYSTONE_20MM	držák baterie
u2	-	LGA16-3MM	akcelerometr