



Fakulta elektrotechnická
Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Senzorický systém s mikrokontrolérem pro lékařské aplikace

Autor práce: Bc. Stanislav Bečka
Vedoucí práce: Prof. Ing. Milan Štork, CSc.

Plzeň 2015

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Stanislav BEČKA**
Osobní číslo: **E13N0097P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektronika a aplikovaná informatika**
Název tématu: **Senzorický systém s mikrokontrolérem pro lékařské aplikace**
Zadávací katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

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

Návrh měřicího systému s mikrokontrolérem (Kinetics - Freescale) a připojení senzoru magnetického pole a tlakového, teplotního a akceleračního senzoru.

1. Návrh systému a přehled senzorů.
2. Návrh desky senzorů, komunikace s deskou procesoru.
3. Finální návrh zařízení.
4. Ověření funkce systému.



Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:


Internet, Proceedings Applied Electronics 2012 a 2013

Vedoucí diplomové práce: **Prof. Ing. Milan Štork, CSc.**
Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2014**
Termín odevzdání diplomové práce: **11. května 2015**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

Abstrakt

Tato práce pojednává o návrhu a konstrukci senzorického systému pro lékařské aplikace. Systém bude využíván ve spiroergometrii. Systém sestává ze senzorické části a z generátoru EKG signálů. Senzorická část umožňuje měření zrychlení, magnetické indukce, teploty a tlaku. Sensory jsou umístěny na samostatné desce plošného spoje navržené s důrazem na minimální rozměry. Generátor EKG signálů je realizován pomocí externích D/A převodníků připojených k mikrokontroléru. Systém je možné ovládat z osobního počítače pomocí uživatelských aplikací napsaných v jazyce C#. V práci je podrobně popsáno řešení systému z hlediska přístrojového a programového vybavení. Ověření senzorické části systému bylo provedeno pomocí elektrodynamického vibrátoru. Průběhy generované pomocí generátoru EKG signálů byly ověřeny pomocí osciloskopu. Výsledkům testů je věnována samostatná kapitola.

Klíčová slova

senzorický systém, generátor EKG signálů, spiroergometrie, akcelerometr, senzor magnetického pole, senzor tlaku a teploty

Abstract

Bečka, Stanislav. *Sensoric system with microcontroller for medical purposes* [*Senzorický systém s mikrokontrolérem pro lékařské aplikace*]. Pilsen, 2015. Master thesis (in Czech). University of West Bohemia. Faculty of Electrical Engineering. Department of Applied Electronics and Telecommunications. Supervisor: Milan Štork

This thesis deals with the design and construction of a sensoric system for medical purposes. The system will be used in spiroergometry. The system consists of a sensoric part and of an ECG generator. The sensoric part allows acceleration, magnetic field, temperature and pressure measurements. Sensors are placed on a separated printed circuit board designed with focus on minimal dimensions. The ECG generator is based on external D/A converters connected to a microcontroller. The system can be controlled from personal computer via user applications written in C#. In the thesis there are described hardware and software solutions of the system. Verification of the sensoric part was done by electrodynamic shaker. Signals generated from ECG generator were verified by oscilloscope. Test results are described in a separate chapter.

Keywords

sensoric system, ECG generator, spiroergometry, accelerometer, magnetic field sensor, temperature and pressure sensor

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem svou závěrečnou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové 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 diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 270 trestního zákona č. 40/2009 Sb.

Také prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

V Plzni dne 11. května 2015

Bc. Stanislav Bečka

.....

Podpis

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu práce panu prof. Ing. Milanu Štorkovi, CSc. za poskytnutí cenných rad, ochotu a pomoc v průběhu tvorby této diplomové práce.

Obsah

Seznam obrázků	x
Seznam tabulek	xi
Seznam symbolů a zkratek	xii
1 Úvod	1
2 Návrh systému	2
3 Návrh systému z hlediska přístrojového vybavení	3
3.1 Napájecí část	3
3.2 Mikrokontrolér	4
3.2.1 Parametry	4
3.2.2 Schéma zapojení	4
3.2.3 Komunikační rozhraní	6
3.2.3.1 I ² C	6
3.2.3.2 SPI	8
3.2.3.3 UART	8
3.3 Akcelerometr	9
3.3.1 Parametry	10
3.3.2 Blokové schéma	10
3.3.3 Schéma zapojení	11
3.3.4 Režimy činnosti	11
3.3.5 Komunikace s mikrokontrolérem	13
3.3.5.1 Inicializace	13
3.3.5.2 Odesílání naměřených dat	13
3.4 Senzor magnetického pole	14
3.4.1 Parametry	15
3.4.2 Blokové schéma	16
3.4.3 Schéma zapojení	16
3.4.4 Režimy činnosti	17
3.4.5 Komunikace s mikrokontrolérem	17

3.4.5.1	Inicializace	17
3.4.5.2	Odesílání naměřených dat	18
3.5	Tlakový a teplotní senzor	19
3.5.1	Parametry	20
3.5.2	Blokové schéma	21
3.5.3	Schéma zapojení	21
3.5.4	Režimy činnosti	21
3.5.5	Komunikace s mikrokontrolérem	22
3.5.5.1	Inicializace	22
3.5.5.2	Odesílání naměřených dat	23
3.6	D/A převodník	25
3.6.1	Parametry	25
3.6.2	Blokové schéma	25
3.6.3	Schéma zapojení	26
3.6.4	Komunikace s mikrokontrolérem	27
3.6.4.1	Popis komunikace	27
3.6.4.2	Příklad komunikace	28
3.7	LCD displej	29
4	Návrh systému z hlediska programového vybavení	31
4.1	Aplikace SENZORY	31
4.1.1	Popis aplikace	31
4.1.2	Komunikace mezi mikrokontrolérem a osobním počítačem	33
4.1.2.1	Přijímaná data mikrokontrolérem	33
4.1.2.2	Odesílaná data mikrokontrolérem	34
4.1.3	Popis programu SENZORY mikrokontroléru	35
4.2	Aplikace GENERÁTOR	38
4.2.1	Popis aplikace pro osobní počítač	38
4.2.2	Komunikace mezi mikrokontrolérem a osobním počítačem	38
4.2.2.1	Přijímaná data mikrokontrolérem	38
4.2.3	Popis programu GENERÁTOR mikrokontroléru	39
5	Ověření funkce systému	43
5.1	Ověření funkce senzorické části systému	43
5.2	Ověření funkce generátoru EKG	45
6	Závěr	48
	Reference, použitá literatura	50
	Přílohy	51

A Schémata zapojení	51
A.1 Deska se senzory	51
A.2 Deska s mikrokontrolérem a D/A převodníky	52
B Desky plošných spojů	54
B.1 Deska se senzory	54
B.2 Deska s mikrokontrolérem a D/A převodníky	54
C Seznamy součástek	59
C.1 Deska se senzory	59
C.2 Deska s mikrokontrolérem a D/A převodníky	59

Seznam obrázků

2.1	Blokové schéma navrženého systému	2
3.1	Schéma zapojení napájecí části systému	4
3.2	Schéma zapojení mikrokontroléru MKL25Z128VLK4	5
3.3	Zápis do jednoho registru senzoru, převzato z [5]	7
3.4	Zkrácený zápis do více registrů senzoru, převzato z [5]	7
3.5	Čtení jednoho registru senzoru, převzato z [5]	7
3.6	Zkrácené čtení více registrů senzoru, převzato z [5]	8
3.7	Přenos dat mezi mikrokontrolérem a D/A převodníkem, převzato z [6]	9
3.8	Schéma zapojení obvodu FT230XS	9
3.9	Akcelerometr MMA8491Q	10
3.10	Definice rozložení os senzoru MMA8491Q, převzato z [3]	10
3.11	Blokové schéma senzoru MMA8491Q, převzato z [3]	10
3.12	Schéma zapojení senzoru MMA8491Q	11
3.13	Náklon senzoru MMA8491Q ve směru jedné z os, převzato z [3]	12
3.14	Přechod mezi jednotlivými režimy činnosti senzoru MMA8491Q, převzato z [3]	12
3.15	Čtení datových registrů senzoru MMA8491Q přes rozhraní I ² C - část 1	13
3.16	Čtení datových registrů senzoru MMA8491Q přes rozhraní I ² C - část 2	14
3.17	Senzor magnetického pole MAG3110	15
3.18	Definice rozložení os senzoru MAG3110, převzato z [5]	15
3.19	Blokové schéma senzoru MAG3110, převzato z [5]	16
3.20	Schéma zapojení senzoru MAG3110	16
3.21	Čtení datových registrů senzoru MAG3110 přes rozhraní I ² C - část 1	18
3.22	Čtení datových registrů senzoru MAG3110 přes rozhraní I ² C - část 2	19
3.23	Tlakový a teplotní senzor MPL3115A2	20
3.24	Blokové schéma senzoru MPL3115A2, převzato z [4]	21
3.25	Schéma zapojení senzoru MPL3115A2	22
3.26	Přechod mezi jednotlivými režimy činnosti senzoru MPL3115A2, převzato z [4]	22
3.27	Průběh čtení stavového registru (INT_SOURCE) senzoru MPL3115A2 přes rozhraní I ² C	24

3.28	Čtení datových registrů senzoru MPL3115A2 přes rozhraní I ² C	24
3.29	D/A převodník s rezistorovou sítí s napěťovým výstupem, převzato z [6]	25
3.30	Blokové schéma D/A převodníku MAX537, převzato z [6]	26
3.31	Schéma zapojení D/A převodníku MAX537	27
3.32	Schéma zapojení napěťové reference LM385	27
3.33	Formát příkazu D/A převodníku, převzato z [6]	27
3.34	Výpočet výstupního napětí D/A převodníku dle vstupního kódu, převzato z [6]	28
3.35	Příklad komunikace mikroprocesoru s D/A převodníkem	29
3.36	Konektor pro připojení LCD displeje	30
4.1	Grafický snímek obrazovky zachycující aplikaci SENZORY	32
4.2	Konfigurační textový soubor MAG_config.txt senzoru magnetického pole	32
4.3	Textový soubor MAG_data.txt obsahující naměřené vzorky magnetické indukce	33
4.4	Vývojový diagram obslužné rutiny přerušení od UARTu programu SENZORY	36
4.5	Vývojový diagram obslužné rutiny přerušení od čítače programu SENZORY	36
4.6	Vývojový diagram obslužné rutiny přerušení od brány A programu SENZORY	37
4.7	Vývojový diagram hlavní smyčky programu SENZORY	37
4.8	Grafický snímek obrazovky zachycující aplikaci GENERÁTOR	39
4.9	Vývojový diagram obslužné rutiny přerušení od UARTu programu GENERÁTOR	41
4.10	Vývojový diagram obslužné rutiny přerušení od čítače programu GENERÁTOR	41
4.11	Vývojový diagram hlavní smyčky programu GENERÁTOR	42
5.1	Naměřená zrychlení ve směru všech tří os při postupném rozkmitávání plošiny sinusovým signálem o frekvenci 10, 20, 30 a 40 Hz	44
5.2	Naměřené zrychlení ve směru osy z s vyznačenými vzorky během jedné periody při rozkmitání plošiny sinusovým signálem o frekvenci 10 Hz	44
5.3	Naměřené magnetické indukce ve směru všech tří os při postupném rozkmitávání plošiny obdélníkovým, trojúhelníkovým a sinusovým signálem o frekvenci 0,5 Hz	45
5.4	Naměřená magnetická indukce ve směru osy x s vyznačenými vzorky během jedné periody při rozkmitání plošiny obdélníkovým signálem o frekvenci 0,5 Hz	45
5.5	Upravené vzorky průběhů EKG signálů	46
5.6	Průběhy EKG signálů zaznamenané osciloskopem	47
5.7	Přiblížené průběhy EKG signálů zaznamenané osciloskopem	47

A.1	Schéma zapojení desky se senzory	51
A.2	Schéma zapojení desky s mikrokontrolérem a D/A převodníky - část 1 . . .	52
A.3	Schéma zapojení desky s mikrokontrolérem a D/A převodníky - část 2 . . .	53
B.1	Vodivý motiv plošného spoje desky se senzory - horní strana, měřítko 2:1 .	54
B.2	Vodivý motiv plošného spoje desky se senzory - spodní strana, měřítko 2:1	54
B.3	Osazovací výkres desky se senzory - horní strana, měřítko 2:1	55
B.4	Osazovací výkres desky se senzory - spodní strana, měřítko 2:1	55
B.5	Vodivý motiv plošného spoje desky s mikrokontrolérem a D/A převodníky - horní strana, měřítko 1:1	56
B.6	Vodivý motiv plošného spoje desky s mikrokontrolérem a D/A převodníky - spodní strana, měřítko 1:1	57
B.7	Osazovací výkres desky s mikrokontrolérem a D/A převodníky, měřítko 1:1	58

Seznam tabulek

3.1	Adresy použitých senzorů	6
4.1	Paket dat pro nastavení vzorkovací frekvence senzorů	33
4.2	Přijímané bajty mikrokontrolérem v aplikaci SENZORY	34
4.3	Paket dat obsahující vektor zrychlení změřený senzorem MMA8491Q	34
4.4	Paket dat obsahující vektor magnetické indukce změřený senzorem MAG3110	35
4.5	Paket dat obsahující teplotu a tlak změřené senzorem MPL3115A2	35
4.6	Paket dat obsahující vzorky pro D/A převodník	39
4.7	Paket dat pro nastavení vzorkovací frekvence D/A převodníku	39
4.8	Přijímané bajty mikrokontrolérem v aplikaci GENERÁTOR	40
C.1	Seznam součástí desky se senzory	59
C.2	Seznam součástí desky s mikrokontrolérem a D/A převodníky	60

Seznam symbolů a zkratek

\vec{a}	Zrychlení [g].
\vec{B}	Magnetická indukce [T].
FIFO	First In First Out.
FLASH	Elektricky programovatelná paměť s libovolným přístupem.
h	Nadmořská výška [m].
I ² C	Inter-Integrated Circuit.
LCD	Liquid Crystal Display. Displej z tekutých krystalů.
LGA	Land Grid Array. Pouzdro součástky.
LQFP	Low Profile Quad Flat Package. Pouzdro součástky.
LSB	Least Significant Bit. Nejméně významný bit.
MEMS	Micro-Electro-Mechanical Systems. Mikro-Elektro-Mechanické Systémy.
MSB	Most Significant Bit. Nejvíce významný bit.
p	Tlak [Pa].
p_0	Referenční hodnota tlaku [Pa].
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter. Univerzální asynchronní přijímač a vysílač.
Universal Serial Bus ..	Univerzální sériová sběrnice.
SMD	Surface Mounted Device. Součástka pro povrchovou montáž.
SO	Small Outline. Pouzdro součástky.
SOT	Small Outline Transistor. Pouzdro součástky.
SPI	Serial Peripheral Interface. Sériové periferní rozhraní.
SRAM	Static RAM. Statická paměť RAM.
SWD	Serial Wire Debug.
T	Teplota [$^{\circ}C$].
Φ	Úhel náklonu [rad].
K_1	Konstanta (44330, 77 [m]).
K_2	Konstanta (0, 1902632 [$-$]).

1

Úvod

Cílem práce je navrhnout a sestavit senzorický systém pro lékařské aplikace. Součástí systému by měly být desky plošného spoje se senzory používanými pro měření v oblasti lékařství, konkrétně senzorem pro měření teploty a tlaku, senzorem magnetického pole a akcelerometrem. Další část systému by měl tvořit generátor EKG průběhů. Celý systém by měl být řízen mikrokontrolérem. Systém by mělo být možné ovládat z osobního počítače pomocí uživatelských aplikací.

Realizovaný senzorický systém by měl nalézt využití v spiroergometrii. Spiroergometrie je zátěžové vyšetření, které propojuje zátěžovou elektrokardiografii (ergometrie) s funkční analýzou plic (spirometrie). Vyšetření umožňuje lékaři sledovat záznam elektrické aktivity srdce, krevní tlak a tepovou frekvenci při různých intenzitách zátěže. Postupné zvyšování zátěže během vyšetření umožňuje speciální bicykl nebo běžící pás. Dále se měří plicní ventilace (objem vydechaného vzduchu) spolu s podílem kyslíku a oxidu uhličitého ve vydechaném vzduchu. Pomocí tohoto vyšetření lze vyhodnotit funkci kardiovaskulárního a respiračního systému a odhalit případná onemocnění.

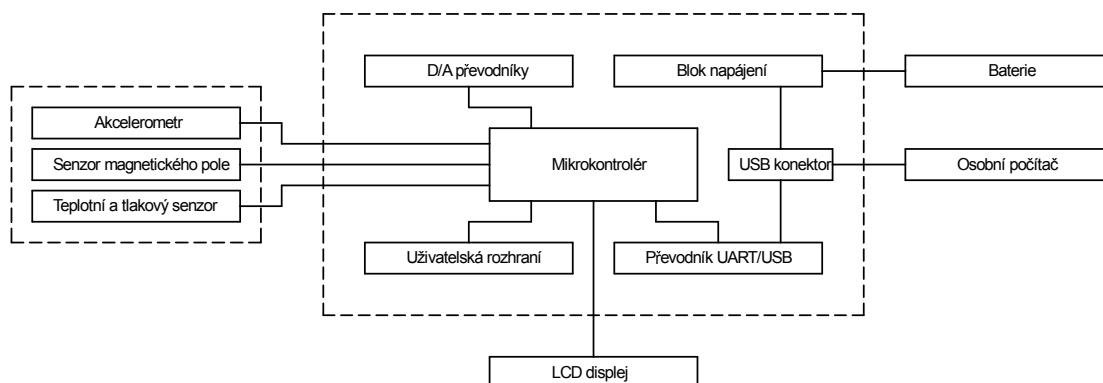
Systém by měl být dále využíván v oblasti elektrokardiografie. Pomocí generátoru EKG signálů by mělo být možné simulovat průběhy EKG. Generovaný signál lze použít pro testování přístrojů určených pro snímání EKG jako je elektrokardiogram či holter.

První kapitola obsahuje blokové schéma navrženého systému. Další část práce se zabývá návrhem systému z hlediska přístrojového vybavení. Jsou zde uvedeny vlastnosti, parametry a schémata zapojení použitých senzorů, D/A převodníků, mikrokontroléru a displeje. Dále je zde popsáno schéma napájecí části zařízení. Následující kapitola se zabývá návrhem systému z hlediska programového vybavení. V této kapitole jsou popsány aplikace pro osobní počítač a jim odpovídající vývojové diagramy programů mikrokontroléru. Dále jsou v práci podrobně popsány testy provedené k ověření funkce systému. Závěr obsahuje zhodnocení dosažených výsledků.

2

Návrh systému

Navržený systém sestává celkem ze dvou desek plošných spojů. Na větší desce jsou umístěny mikrokontrolér, D/A převodníky, převodník UART/USB, blok napájení a uživatelská rozhraní. Mikrokontrolér zajišťuje řízení celého systému. Externí D/A převodníky slouží pro generování EKG signálů. Uživatelská rozhraní slouží pro obsluhu zařízení. Patří mezi dvě připojená tlačítka a potenciometr připojený na jeden z kanálů A/D převodníku mikrokontroléru. Zařízení je možné napájet z baterie nebo z USB konektoru. Blok napájení zajišťuje úpravu napájení pro jednotlivé části systému. Menší deska obsahuje teplotní a tlakový senzor, akcelerometr a senzor magnetického pole a je připojena k větší desce pomocí kabelu s konektory. K mikrokontroléru je rovněž přes konektor připojen LCD displej. Displej slouží k zobrazení naměřených dat ze senzorů a pro informování obsluhy zařízení. Komunikace mezi mikrokontrolérem a osobním počítačem je realizována pomocí sériového rozhraní UART, převodníku USB/UART a sériového rozhraní USB. Jednotlivé bloky jsou dále v práci podrobněji popsány. Větší deska je v práci označována jako deska s mikrokontrolérem a D/A převodníky, menší jako deska se senzory. Schémata zapojení obou desek plošných spojů lze nalézt v přílohách práce (A). Blokové schéma je uvedeno na obr. 2.1.



Obr. 2.1: Blokové schéma navrženého systému

3

Návrh systému z hlediska přístrojového vybavení

3.1 Napájecí část

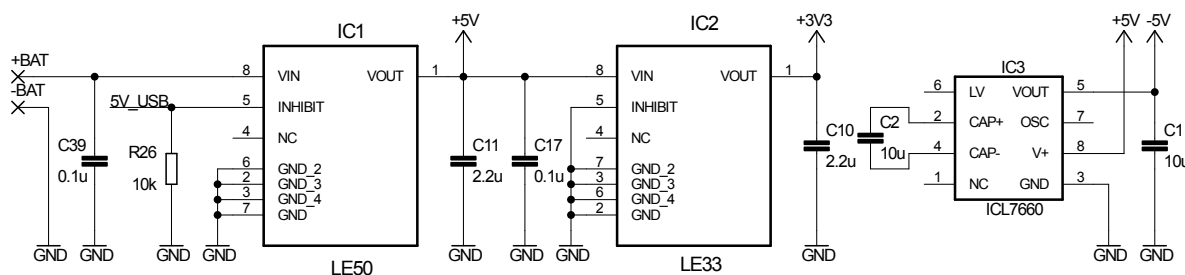
Zařízení může být napájeno z baterie nebo z konektoru USB. Na deskách plošných spojů jsou celkem tři rozvody napájení: + 5 V, - 5V a +3,3 V a rozvod země. Rozvod země je rozdělen zvlášť pro analogové (analogová zem) a zvlášť pro číslicové obvody (číslicová zem). Analogová a číslicová zem jsou spojeny vždy jen v jednom bodě před SMD rezistor o nulovém odporu.

Napětí + 5 V je buď získáno prostřednictvím USB konektoru nebo pomocí lineárního regulátoru napětí LE50CD. Jedná se o regulátor s velmi nízkým úbytkem napětí (0,2 V) mezi jeho vstupem a výstupem umístěný v pouzdře SO-8. Dle specifikace výrobce se tento regulátor hodí pro aplikace s nízkým rušením, nízkou spotřebou a napájených z baterie. Navíc tento obvod obsahuje vstup INHIBIT, který slouží k přechodu tohoto obvodu do režimu STANDBY s velmi nízkou spotřebou (50 μ A). Pokud je zařízení napájeno přes USB z počítače, je tento obvod vypnut a dochází jen k částečnému vybíjení baterie vlivem proudu v režimu STANDBY. Napětí + 5 V je poté získáno z USB konektoru přes oddělovací Schottkyho diodu. Napětím + 5V jsou napájeny LCD displej, D/A převodníky a operační zesilovače.

Napětí -5 V zajišťuje integrovaný obvod ICL7660 v pouzdře SO-8. Jedná se o invertující DC/DC měnič. Na jeho vstup je připojeno výstupní napětí +5 V regulátoru LE50CD nebo napětí + 5 V z USB snížené o úbytek napětí na oddělovací diodě. Napětím - 5V jsou v zařízení napájeny A/D převodníky a operační zesilovače.

Napětí + 3,3 V obstarává lineární regulátor napětí LE33CD integrovaný v pouzdře SO-8. Jedná se stejně jako v případě obvodu LE50CD o regulátor s nízkým úbytkem napětí (0,2 V) hodícím se pro aplikace napájené z baterie s důrazem na nízké rušení a spotřebu. Vstup INHIBIT tohoto obvodu není využíván a je připojen na zem. Napětí +3,3 V slouží pro napájení mikrokontroléru, připojených senzorů a na toto napájení jsou

rovněž připojena tlačítka.



Obr. 3.1: Schéma zapojení napájecí části systému

3.2 Mikrokontrolér

Použitý mikrokontrolér nese označení MKL25Z128VLK4. Výrobce tohoto obvodu je firma Freescale Semiconductor. Jedná se o 32bitový mikrokontrolér založený na jádře ARM CortexTM-M0+. Mikrokontrolér patří do série Kinetis L, která klade důraz na nízkou spotřebu.

3.2.1 Parametry

Taktovací frekvence jádra může dosahovat až 48 MHz. Frekvence hodinové sběrnice pro zabudované periférie může být až 24 MHz. Program je ukládán do paměti typu FLASH o velikosti 128 kB. Pro ukládání je k dispozici SRAM paměť o velikosti 16 kB. Mikrokontrolér obsahuje řadiče pro komunikační sériová rozhraní: 1 kanál USB, 2 kanály SPI, 2 kanály I²C a 3 kanály UART. Celkový počet všeobecně použitelných vstupů a výstupů je 66. Programování a ladění probíhá prostřednictvím SWD rozhraní. Pro programování a ladění programů byl využit vývojový kit FRDM-KL25Z s programátorem USBDM. Obvod lze napájet napětím v rozmezí od 1,71 V do 3,6 V. Pracovní teplotní rozsah je od -40 °C do + 105 °C. Obvod je integrován v pouzdře LQFP s 80 vývody.

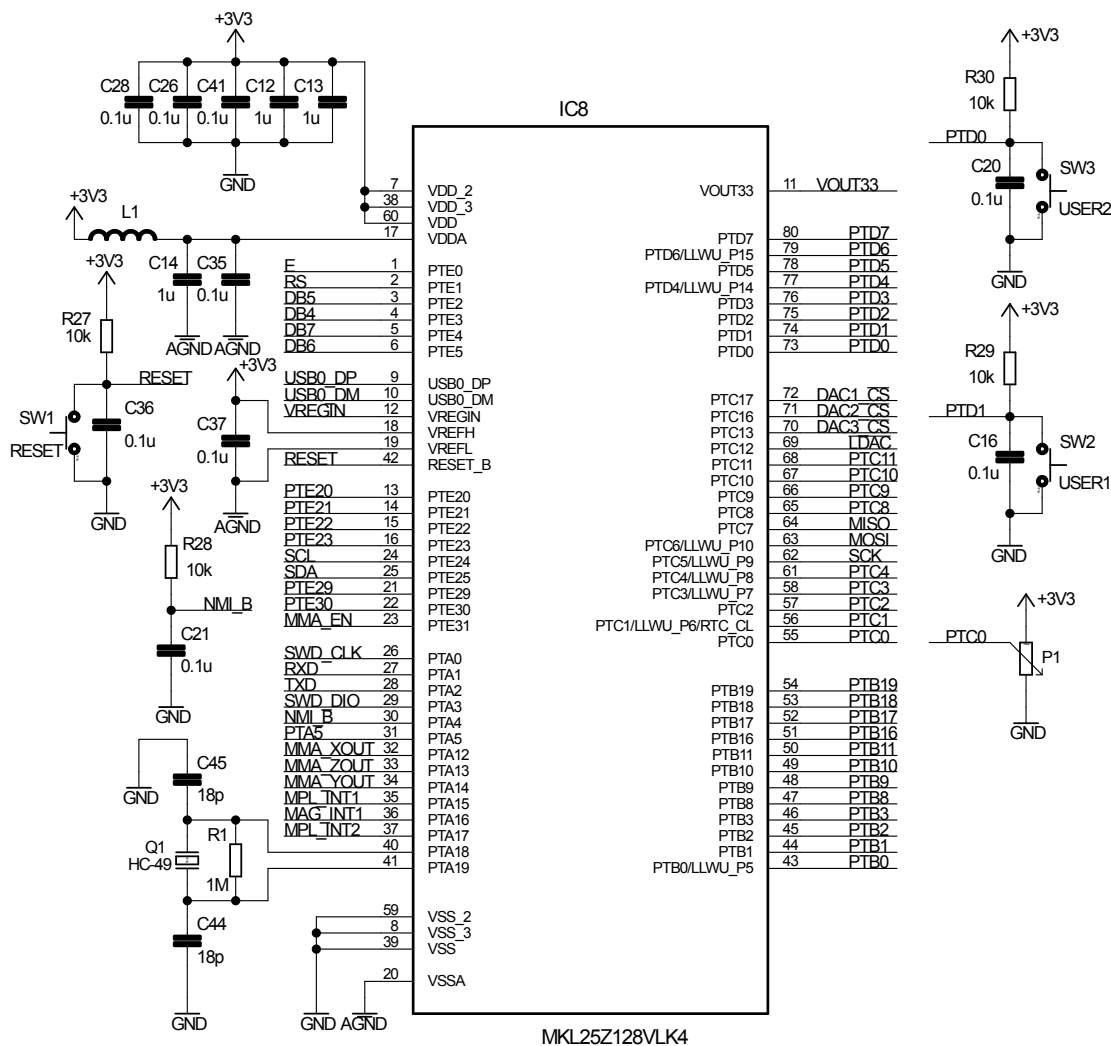
3.2.2 Schéma zapojení

Schéma zapojení mikrokontroléru je uvedeno na obr. 3.2. Na všechny napájecí vývody mikrokontroléru jsou připojeny blokovací kondenzátory o hodnotě kapacity 100 nF. Na vybrané vývody jsou připojeny rovněž blokovací kondenzátory o hodnotě kapacity 1 μ F. Číslicové napájení mikrokontroléru je odděleno od analogového LC filtrem z důvodu zamezení pronikání rušení z číslicové části do analogové části. Vstup vnějšího nemaskovaného přerušení není v zařízení využíván. Tento vstup je připojen přes pull-up rezistor o hodnotě odporu 10 k Ω na napájecí napětí a je k němu rovněž paralelně připojen kondenzátor o hodnotě kapacity 100 nF. Pro generování hodinových signálů je připojen krystalový

oscilátor s krystalem o frekvenci 8 MHz. Ve všech aplikacích je tato frekvence pomocí násobičky, děličky a fázového závěsu zvětšena na 48 MHz pro jádro mikrokontroléru a 24 MHz pro hodinovou sběrnici periférií.

K mikrokontroléru jsou připojena celkem 3 tlačítka. První tlačítko slouží k nastavení mikrokontroléru do počátečního stavu. Zbývá dvě tlačítka jsou uživatelská. Všechna tlačítka jsou připojena přes pull-up rezistor na napájecí napětí kvůli definované logické úrovni na vstupu mikrokontroléru při rozpojených kontaktech tlačítka. Ke každému tlačítku je rovněž paralelně připojen kondenzátor pro omezení zákmitů. Na jeden z kanálů A/D převodníku mikrokontroléru je připojen potenciometr. Uživatelská tlačítka a potenciometr slouží pro obsluhu zařízení. Pomocí tlačítek lze spouštět a zastavovat generátor EKG signálů a dále přepínat mezi jednotlivými senzory. A/D převodník nalezne využití při nastavování vzorkovací frekvence použitých D/A převodníků.

Kvůli možnému budoucímu využití jsou všechny nevyužité vývody mikrokontroléru pro všeobecné použití vyvedeny na kolíkové lišty. Z důvodu diagnostiky jsou rovněž vyvedeny vývody, u nichž jsou využívány alternativní funkce.



Obr. 3.2: Schéma zapojení mikrokontroléru MKL25Z128VLK4

3.2.3 Komunikační rozhraní

Mikrokontrolér využívá v aplikacích celkem tři sériová komunikační rozhraní: I²C, SPI a UART.

3.2.3.1 I²C

Sériové rozhraní I²C slouží ke komunikaci s připojenými senzory. Komunikace probíhá po dvou vodičích: SDA (datový) a SCL (hodinový). V aplikaci je frekvence hodinového signálu SCL nastavena na 400 kHz. Toto je maximální hodnota hodinového signálu, kterou lze použít pro komunikaci s použitými senzory. Mikrokontrolér (master) oslovuje připojené senzory (slave) pomocí 7bitové adresy. Data jsou odesílána v paketech rozdělených na jednotlivé bajty odesílané nejvíce významným bitem napřed. Paket začíná odesláním START bitu (ST). Start bit je reprezentován přechodem signálu SDA z log. 1 do log. 0, když je signál SCL v log. 1. Dále následuje první odesílaný bajt. Tento bajt obsahuje adresu senzoru (7 bitů) a bit, který rozhoduje o tom, zda budou data odesílána z mikrokontroléru do senzoru (W - log. 0) nebo zda bude mikrokontrolér přijímat data odesílaná vybraným senzorem (R - log. 1). Po odeslání bajtu je signál SDA v log. 1. Během devátého hodinového impulsu signálu SCL dojde k potvrzení příjmu dat tím, kdo data přijímal. Potvrzení se provede přechodem SDA do log. 0 během zmíněného hodinového impulsu. Tento bit se nazývá AK (acknowledge). Pokud není potvrzeno přijetí dat, je tento bit označován jako NAK (no acknowledge). Paket je ukončen odesláním STOP bitu (SP). Stop bit je reprezentován přechodem signálu SDA z log. 0 do log. 1, když je signál SCL v log. 1. Mikrokontrolér může dále ještě před odesláním STOP bitu generovat opakovaný START bit (SR).

Adresy použitých senzorů, odesílaný bajt pro zápis dat do senzorů a pro čtení dat ze senzorů jsou uvedeny v tab. 3.1.

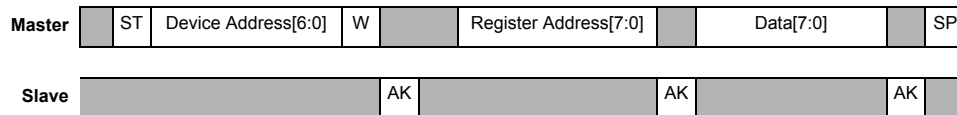
Senzor	Adresa	Odesílaný bajt pro zápis	Odesílaný bajt pro čtení
MMA8491Q	0x55	0xAA	0xAB
MAG3110	0x0E	0x1E	0x1D
MPL3115A2	0x60	0xC0	0xC1

Tab. 3.1: Adresy použitých senzorů

Pro manipulaci s vnitřními registry senzorů MAG3110 a MPL3115A2 lze použít následující operace: zápis do jednoho registru, zkrácený zápis do více registrů, čtení jednoho registru a zkrácené čtení více registrů. Pro manipulaci se senzorem MMA8491Q lze použít jen čtení jednoho registru a zkrácené čtení více registrů, protože senzor neobsahuje žádné konfigurační registry.

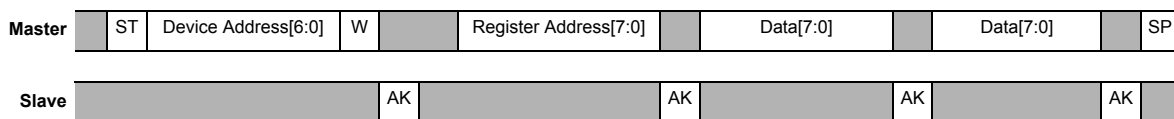
Při zápisu do jednoho registru senzoru mikrokontrolér nejprve generuje START bit, odesílá adresu zvoleného senzoru a dále odesílá bit signalizující, že se bude do senzoru

zapisovat. Senzor po příjmu tohoto prvního bajtu potvrdí příjem odesláním potvrzovacího bitu AK. Dále mikrokontrolér odesílá adresu registru, do něhož se má zapsat. Senzor po přijetí této adresy znovu potvrdí příjem odesláním potvrzovacího bitu. V posledním odeslaném bajtu odešle mikrokontrolér data pro zápis, senzor příjem potvrdí a mikrokontrolér generuje STOP bit. Zápis do jednoho registru znázorňuje obr. 3.3.



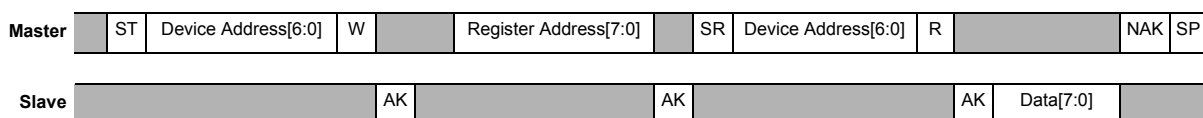
Obr. 3.3: Zápis do jednoho registru senzoru, převzato z [5]

V případě nutnosti zápisu do více registrů najednou není potřeba opakovat tuto sekvenci pro každý registr zvlášť. Mikrokontrolér provede všechny potřebné kroky popsané v zápisu jen do jednoho registru s tím rozdílem, že po odeslání bajtu dat není přenos ukončen, ale mikrokontrolér posílá další data. Senzor po každém přijatém bajtu dat automaticky inkrementuje adresu registru. Místo adres všech registrů, do nichž se má zapsat, se tedy posílá jen adresa počátečního registru. Po zapsání dat do všech požadovaných registrů senzoru vygeneruje mikrokontrolér STOP bit, pomocí kterého ohlašuje senzoru konec operace zápisu do více registrů. Zkrácený zápis do více registrů je vyobrazen na obr. 3.4.



Obr. 3.4: Zkrácený zápis do více registrů senzoru, převzato z [5]

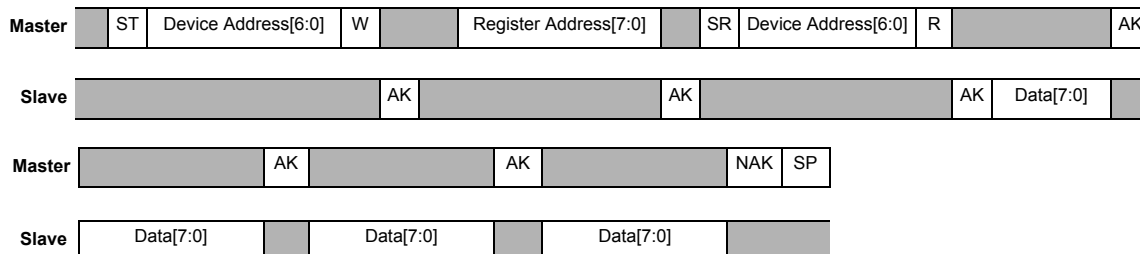
Při čtení jednoho registru senzoru mikrokontrolér nejprve generuje START bit, odesílá adresu zvoleného senzoru a dále odesílá bit signalizující, že se bude do senzoru zapisovat. Senzor po příjmu tohoto prvního bajtu potvrdí příjem odesláním potvrzovacího bitu AK. Dále mikrokontrolér odesílá adresu registru, jehož obsah se bude dále číst. Senzor po přijetí této adresy znovu potvrdí příjem odesláním potvrzovacího bitu. Poté mikrokontrolér generuje opakovaný START bit, odesílá adresu zvoleného senzoru a dále odesílá bit signalizující, že se bude ze senzoru číst. Senzor potvrdí příjem odesláním AK. V posledním kroku senzor odešle obsah čteného registru, mikrokontrolér nepotvrdí příjem a generuje STOP bit. Čtení jednoho registru senzoru je zobrazeno na obr. 3.5.



Obr. 3.5: Čtení jednoho registru senzoru, převzato z [5]

V případě nutnosti čtení více registrů senzoru najednou není potřeba opakovat tuto sekvenci pro každý registr zvlášť. Mikrokontrolér provede všechny potřebné kroky popsané

v čtení jen jednoho registru s tím rozdílem, že po přijetí jednoho bajtu dat není přenos ukončen. Mikrokontrolér potvrdí příjem pomocí AK, senzor automaticky inkrementuje adresu registru a odesílá obsah následujícího registru. Mikrokontrolér dále potvrzuje příjem odesláním AK. Po přečtení posledního registru mikrokontrolér nepotvrdí příjem, čímž ohlašuje senzoru konec operace čtení více registrů a generuje STOP bit. Zkrácené čtení více registrů senzoru je uvedeno na obr. 3.6.



Obr. 3.6: Zkrácené čtení více registrů senzoru, převzato z [5]

3.2.3.2 SPI

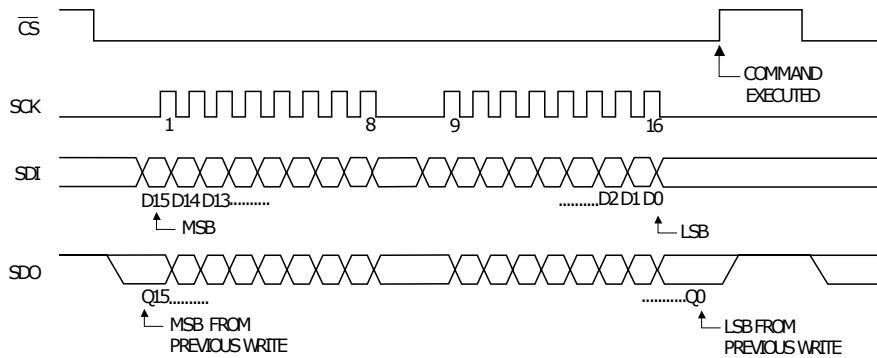
Sériové rozhraní SPI se používá pro komunikaci s připojenými D/A převodníky. Komunikace probíhá po čtyřech vodičích: MOSI (datový), MISO (datový), SCK (hodinový) a \overline{SS} (výběrový). Signál MOSI slouží k přenosu dat ve směru z mikrokontroléru do převodníku (vývod SDI). Signál MISO slouží k přenosu dat ve směru z převodníku (vývod SDO) do mikrokontroléru. Mikrokontrolér vystupuje jako master a generuje hodinový signál SCK. V aplikaci je frekvence hodinového signálu SCK je nastavena na 3 MHz. Klidová úroveň hodinového signálu je log. 0. Data jsou po vodičích MOSI a MISO sériově posouvána s naběžnou hranou hodinového signálu SCK. Data jsou odesílána po bajtech, přičemž první odesílaný bit je bit s největší vahou (MSB).

Před přenosem dat nejprve mikrokontrolér vybere výběrovým signálem \overline{SS} požadovaný převodník (vývod \overline{CS}). Dále odesílá do převodníku 16bitové příkazy a zároveň přijímá z převodníku příkaz, který do něj odeslal v minulém kroku. Ověří tím, zda byl předcházející příkaz korektně přijat. Příjem předcházejícího příkazu rovněž signalizuje, že byl nový příkaz celý odeslán.

Přenos dat mezi mikrokontrolérem a převodníkem je znázorněn na obr. 3.7. Význam jednotlivých bitů příkazů je popsán v kapitole 3.6.4.1.

3.2.3.3 UART

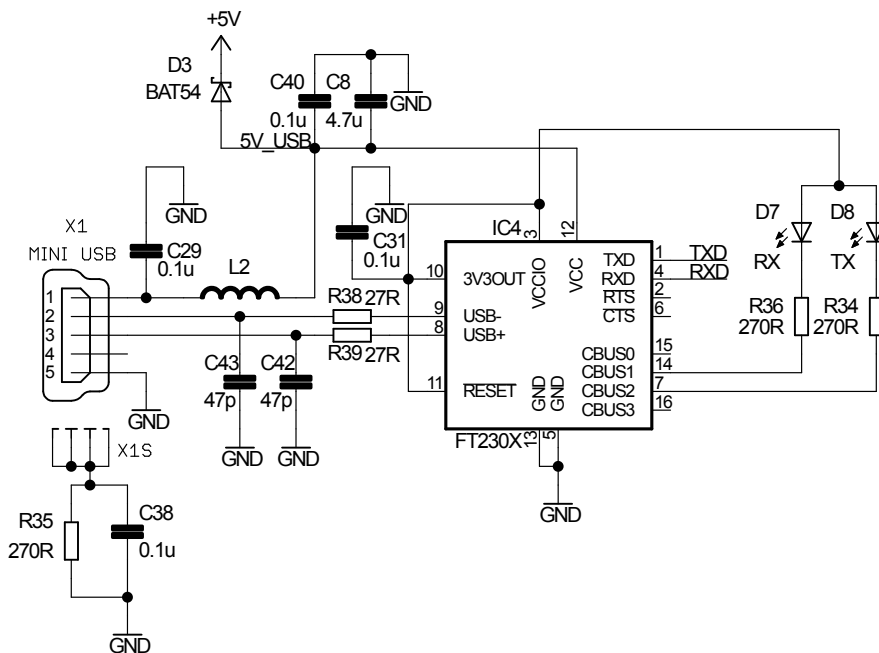
Sériové rozhraní UART slouží k plně duplexní komunikaci mezi mikrokontrolérem a osobním počítačem. Komunikace je realizována prostřednictvím 2 vodičů RX (vysílací) a TX (přijímací). Modulační rychlost je ve všech aplikacích nastavena na 115200 baud. V klidu je vysílač ve stavu log. 1. Při odesílání dat se nejprve odesílá start bit (log. 0), dále datové bity, přídatný bit a stop bit (log. 1). Počty datových bitů a stop bitů jsou nastavitelné.



Obr. 3.7: Přenos dat mezi mikrokontrolérem a D/A převodníkem, převzato z [6]

Přídavný bit je paritní bit, který slouží k jednoduché, nikoliv však zaručené detekci chyby v odesílaných datech. V aplikaci jsou data odesílána po bajtech s jedním STOP bitem, paritní bit není využíván. Datové bity jsou odesílány datovým bitem s nejnižší vahou LSB napřed.

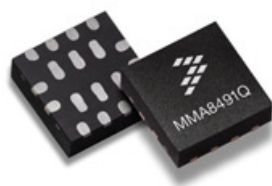
Z důvodu snadného připojení zařízení k osobnímu počítači přes USB rozhraní je použit převodník UART/USB. Převodník má označení FT230XS a je plně kompatibilní se specifikací USB 2.0. Schéma zapojení tohoto obvodu je uvedeno na obr. 3.8.



Obr. 3.8: Schéma zapojení obvodu FT230XS

3.3 Akcelerometr

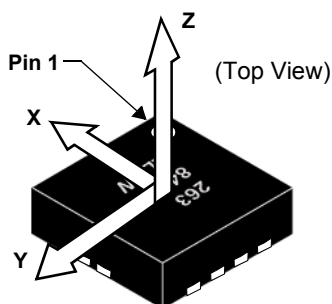
Použitý akcelerometr má označení MMA8491Q a je vyroben technologií MEMS. Výrobem tohoto inteligentního senzoru je firma Freescale Semiconductor.



Obr. 3.9: Akcelerometr MMA8491Q

3.3.1 Parametry

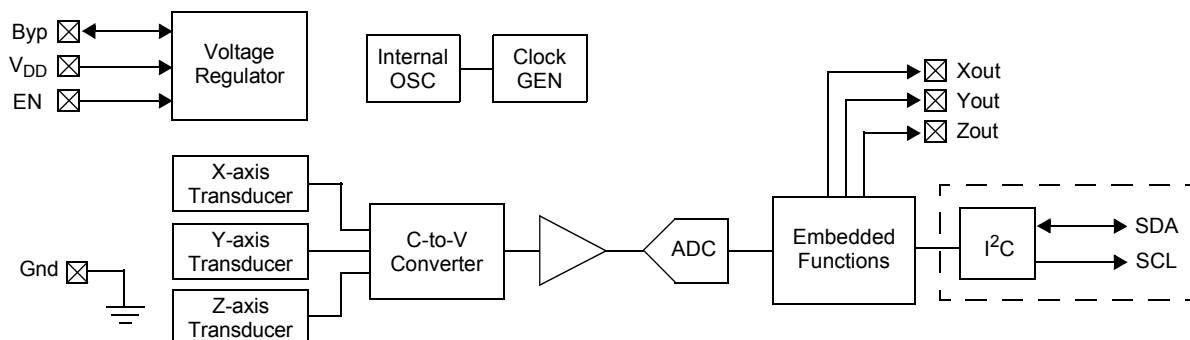
Jedná se o trojosý akcelerometr. Plný měřitelný rozsah zrychlení je od -8 g do $+8\text{ g}$. Vzorkovací frekvence obvodu může dle výrobce dosahovat až 800 Hz . S touto frekvencí souvisí i spotřeba tohoto obvodu, která je dle výrobce 400 nA na jeden Hz . Obvod se hodí pro aplikace s velmi nízkou spotřebou. Definice rozložení os, v jejichž směrech obvod provádí měření zrychlení, je uvedena na obr. 3.10.



Obr. 3.10: Definice rozložení os senzoru MMA8491Q, převzato z [3]

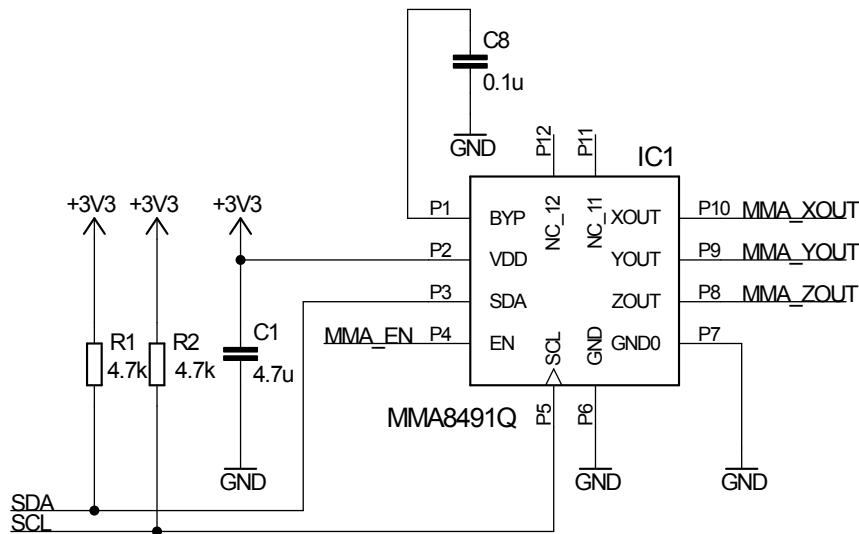
3.3.2 Blokové schéma

Hlavními komponenty integrovanými v obvodu jsou napěťový regulátor, oscilátor, generátor hodinového signálu, blok pro převod kapacity na napětí, zesilovač, A/D převodník, blok realizující komunikaci pomocí sériového rozhraní I²C a blok provádějící zabudované funkce. Blokové schéma akcelerometru je uvedeno na obr. 3.11.



Obr. 3.11: Blokové schéma senzoru MMA81491Q, převzato z [3]

3.3.3 Schéma zapojení



Obr. 3.12: Schéma zapojení senzoru MMA8491Q

Vývody VDD a GND slouží pro napájení obvodu. Na vývod BYP je potřeba připojit kondenzátor pro zajištění správné funkce integrovaného napěťového regulátoru. Vývody SDA a SCL jsou komunikační vývody sériového rozhraní I²C a je potřeba tyto vývody připojit přes rezistory o hodnotě odporu 4,7 kΩ na napájecí napětí. Vstup EN slouží pro odstartování měření.

Výstupy Xout, Yout a Zout se používají k indikaci natočení senzoru v daných osách o více než 43,5°. Úhel náklonu Φ v dané ose lze vypočítat pomocí následujícího vztahu.

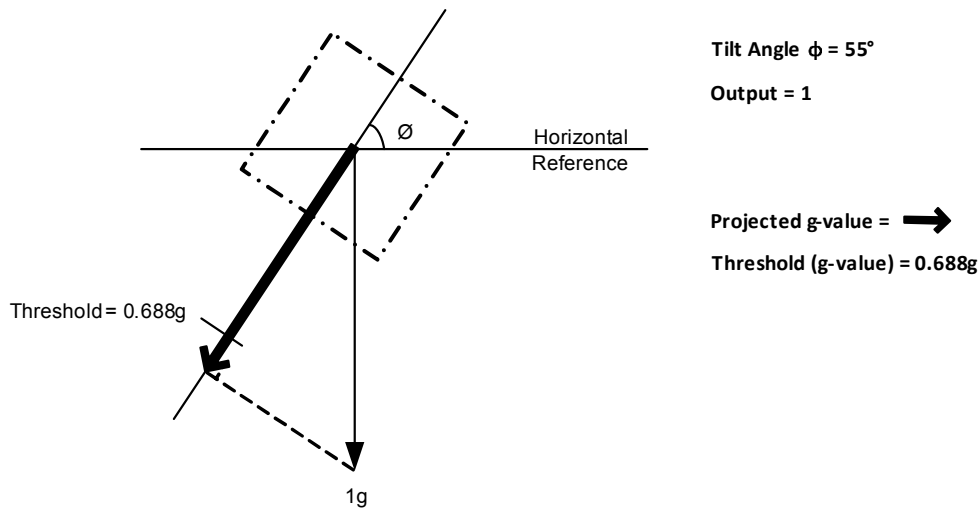
$$\Phi = \arcsin\left(\frac{\text{namerena hodnota zrychleni}}{\text{zrychleni o velikosti 1 g}}\right) \quad [\text{rad}] \quad (3.1)$$

Úhel 43,5° odpovídá naměřené hodnotě zrychlení o vnitřní prahové hodnotě 0,688 g. Je-li absolutní hodnota zrychlení ve směru některé z os vyšší než vnitřní prahová hodnota, výstup odpovídající této ose bude v log. 1. Je-li absolutní hodnota zrychlení ve směru některé z os nižší než vnitřní prahová hodnota, výstup odpovídající této ose bude v log. 0. Náklon senzoru ve směru jedné z os o 55° je zobrazen na obr. 3.13.

3.3.4 Režimy činnosti

Obvod se může nacházet celkem ve čtyřech režimech a to konkrétně v režimech OFF, SHUTDOWN, ACTIVE a STANDBY.

V režimu OFF se nachází senzor, není-li připojen k napájecímu napětí. V tomto režimu nezáleží na hodnotě na vstupu EN a do tohoto režimu přejde obvod z jakéhokoliv dalšího režimu po odpojení napájecího napětí.

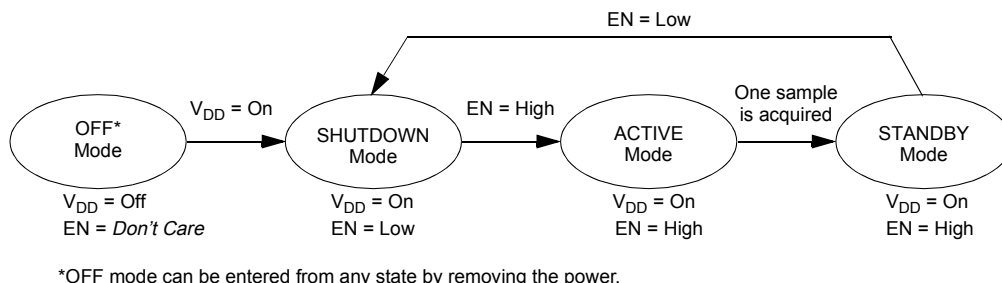


Obr. 3.13: Náklon senzoru MMA8491Q ve směru jedné z os, převzato z [3]

Připojením napájecího napětí přejde obvod do režimu SHUTDOWN. V tomto režimu jsou všechny vnitřní bloky vypnuty a všechny výstupy jsou ve stavu vysoké impedance. Náběžná hrana signálu EN zajistí přechod do režimu ACTIVE. V tomto režimu jsou výstupy Xout, Yout a Zout v logické nule. Obvod provádí jedno měření zrychlení ve směru všech tří os. Získané vzorky jsou převedeny a vykompenzovány na offset a chybu zisku. Zároveň jsou změřená zrychlení ve směru jednotlivých os porovnávána s vnitřní prahovou hodnotou 0.688 g.

Po změření vzorků a porovnání těchto vzorků s prahovou hodnotou přejde obvod automaticky do režimu STANDBY. Zde jsou změřená data připravena pro vyčtení. Naměřená data a hodnoty na výstupech Xout, Yout a Zout jsou v tomto režimu drženy, dokud signál EN nepřejde zpět do log. 0. Doběžná hrana signálu EN způsobí přechod obvodu do režimu SHUTDOWN.

Získání nových vzorků a aktualizace výstupů Xout, Yout a Zout jsou spuštěny opět náběžnou hranou signálu EN. Přechod mezi jednotlivými režimy činnosti obvodu je uveden na obr. 3.14.



Obr. 3.14: Přechod mezi jednotlivými režimy činnosti senzoru MMA8491Q, převzato z [3]

3.3.5 Komunikace s mikrokontrolérem

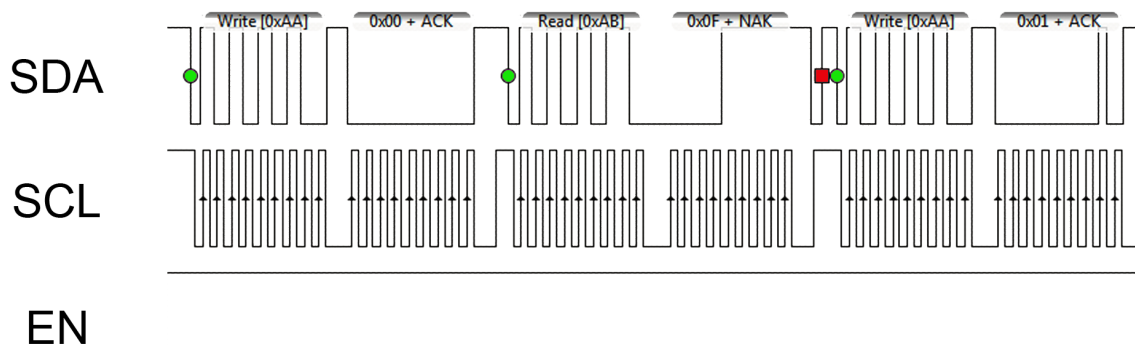
Tato podkapitola popisuje komunikaci mezi mikrokontrolérem a senzorem MMA8491Q. Jsou zde uvedeny průběhy komunikace navzorkované pomocí logického analyzátoru, z nichž je vyhodnocen naměřený vektor zrychlení \vec{a} .

3.3.5.1 Inicializace

Obvod neobsahuje řídicí registry, proto jej není nutné nijak konfigurovat. Měření je spuštěno náběžnou hranou signálu EN, poté obvod potřebuje určitý čas (dle výrobce maximálně $900 \mu\text{s}$), než je možné číst naměřená data a změnit úroveň signálu EN zpět do log. 0. Další měření je spuštěno opět náběžnou hranou signálu EN a celý proces se opakuje. Pro získávání nových vzorků v pravidelných časových intervalech je využit jeden z čítačů mikrokontroléru. Čítač po dosažení nastavené hodnoty odpovídající vzorkovací frekvenci vyvolá přerušování programu. Během obslužné rutiny přerušování se nahodí příznak, který se testuje v hlavní smyčce programu, kde se poté provedou všechny výše popsané kroky.

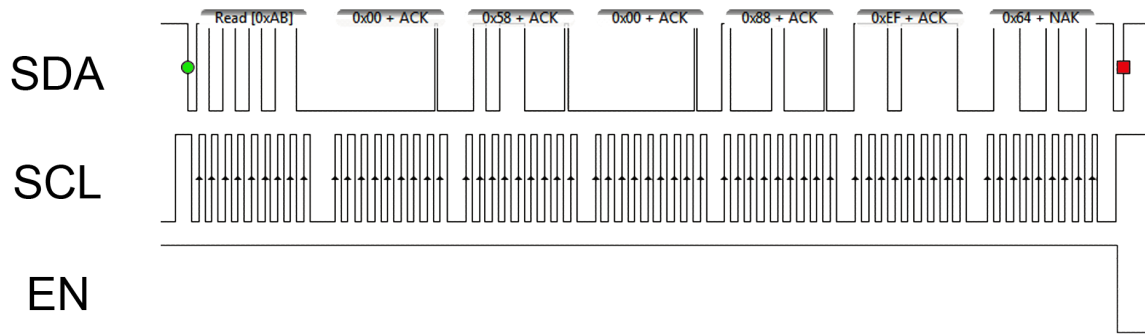
3.3.5.2 Odesílání naměřených dat

Nejprve je potřeba číst stavový registr (STATUS – adresa 0x00). Pokud je v jeho obsahu indikováno, že jsou připravena nová naměřená data, lze tato data číst. Pro naměřená data reprezentující zrychlení ve směru osy x je potřeba číst registry OUT_X_MSB (adresa – 0x01), OUT_X_LSB (adresa - 0x02). Pro naměřená data reprezentující zrychlení ve směru osy y je potřeba číst registry OUT_Y_MSB (adresa – 0x03), OUT_Y_LSB (adresa - 0x04). Pro naměřená data reprezentující zrychlení ve směru osy z je potřeba číst registry OUT_Z_MSB (adresa – 0x05), OUT_Z_LSB (adresa - 0x06). Po přečtení všech těchto registrů je nezbytné převést signál EN zpět do log. 0. Čtení datových registrů přes rozhraní I²C je zobrazeno na obr. 3.15 a na obr. 3.16.



Obr. 3.15: Čtení datových registrů senzoru MMA8491Q přes rozhraní I²C - část 1

Čtení datových registrů obsahujících naměřená data je prováděno pomocí operace zkrácené čtení více registrů senzoru popsané v kap. 3.2.3.1. Z výše uvedeného obrázku jsou patrné obsahy datových registrů, konkrétně OUT_X_MSB (data – 0x00), OUT_X_LSB



Obř. 3.16: Čtení datových registrů senzoru MMA8491Q přes rozhraní I²C - část 2

(data – 0x58), OUT_Y_MSB (data – 0x00), OUT_Y_LSB (data – 0x88), OUT_Z_MSB (data – 0xEF) a OUT_Z_LSB (data – 0x64).

Naměřené hodnoty zrychlení ve směrech všech tří os jsou reprezentovány 14 bity ve dvojkovém doplňku. Číslo 1024 odpovídá zrychlení o velikosti 1 g. Pro vyjádření naměřených hodnot v jednotkách g je nutné získané hodnoty vydělit 1024. Z obsahů datových registrů lze určit tyto hodnoty dle níže uvedených vztahů.

$$\begin{aligned} a_x &= (((OUT_X_MSB \ll 8) | OUT_X_LSB) \gg 2) \cdot \frac{1}{1024} \\ &= (((0x00 \ll 8) | 0x58) \gg 2) \cdot \frac{1}{1024} = \frac{22}{1024} = 0,02 \quad [g] \end{aligned} \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned} a_y &= (((OUT_Y_MSB \ll 8) | OUT_Y_LSB) \gg 2) \cdot \frac{1}{1024} \\ &= (((0x00 \ll 8) | 0x88) \gg 2) \cdot \frac{1}{1024} = \frac{34}{1024} = 0,03 \quad [g] \end{aligned} \quad (3.3)$$

$$\begin{aligned} a_z &= (((OUT_Z_MSB \ll 8) | OUT_Z_LSB) \gg 2) \cdot \frac{1}{1024} \\ &= (((0xEF \ll 8) | 0x64) \gg 2) \cdot \frac{1}{1024} = \frac{-1063}{1024} = -1,04 \quad [g] \end{aligned} \quad (3.4)$$

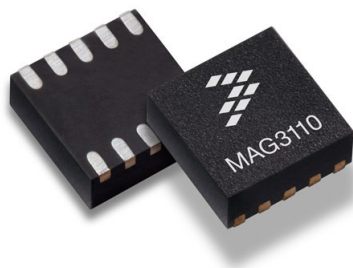
Velikost výsledného vektoru zrychlení \vec{a} lze určit z následujícího vztahu.

$$|\vec{a}| = \sqrt{(a_x)^2 + (a_y)^2 + (a_z)^2} = \sqrt{(0,02)^2 + (0,03)^2 + (-1,04)^2} = 1,04 \quad [g] \quad (3.5)$$

Výsledkem měření je vektor zrychlení $\vec{a} = (a_x; a_y; a_z) = (0,02; 0,03; -1,04)$ o velikosti 1,04 g.

3.4 Senzor magnetického pole

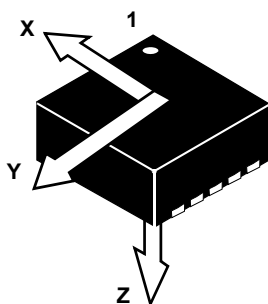
Senzor magnetického pole nese označení MAG3110. Princip měření magnetického pole je založen na magnetorezistivním jevu. Výrobcem tohoto inteligentního senzoru je firma Freescale Semiconductor.



Obr. 3.17: Senzor magnetického pole MAG3110

3.4.1 Parametry

Obvod umožňuje měření vektoru magnetické indukce ve směru os x, y a z. Plný měřitelný rozsah magnetické indukce je od $-1000 \mu\text{T}$ do $+1000 \mu\text{T}$ s udávanou citlivostí $0,1 \mu\text{T}$ na LSB. Definice rozložení os, v jejichž směrech obvod provádí měření magnetické indukce, je uvedena na obr. 3.18.



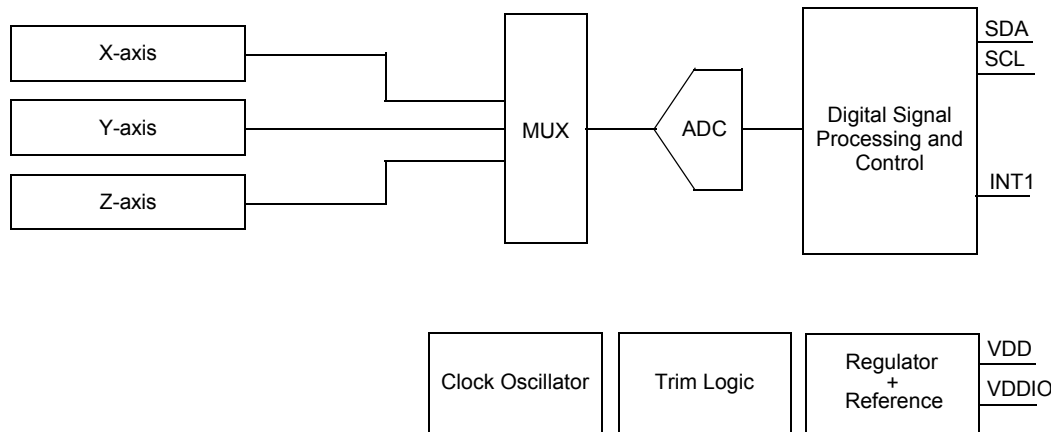
Obr. 3.18: Definice rozložení os senzoru MAG3110, převzato z [5]

Pomocí tohoto senzoru lze rovněž provádět měření teploty v rozsahu od $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ do $85 \text{ }^\circ\text{C}$. Udávaná citlivost senzoru je $1 \text{ }^\circ\text{C}$ na LSB. Frekvence, s jakou odesílá obvod data obsahující naměřené hodnoty, je nastavitelná od nejnižší hodnoty $0,08 \text{ Hz}$ až do maximální hodnoty 80 Hz . Proudový odběr obvodu závisí na této frekvenci a pohybuje se v rozmezí od $8,6 \mu\text{A}$ ($0,08 \text{ Hz}$) do $900 \mu\text{A}$ (80 Hz).

Obvod lze napájet napětím o hodnotě v rozmezí od $1,95 \text{ V}$ do $3,6 \text{ V}$. Komunikace mezi senzorem a mikrokontrolérem probíhá přes sériové rozhraní I²C. Adresa senzoru je $0x0E$. Následuje-li operace čtení ze senzoru, má první odesílaný bajt hodnotu $0x1D$. V případě operace zápisu je jeho hodnota $0x1C$. Frekvence hodinového signálu SCL může být až 400 kHz . Výstupní logické úrovně tohoto obvodu jsou nastavitelné v rozpětí od $1,62 \text{ V}$ do napájecího napětí obvodu. Obvod je schopen provozu v teplotním rozsahu od $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ do $+85 \text{ }^\circ\text{C}$. Obvod je integrován v pouzdře DFN s deseti vývody o rozměrech $2 \times 2 \times 0,85 \text{ mm}$.

3.4.2 Blokové schéma

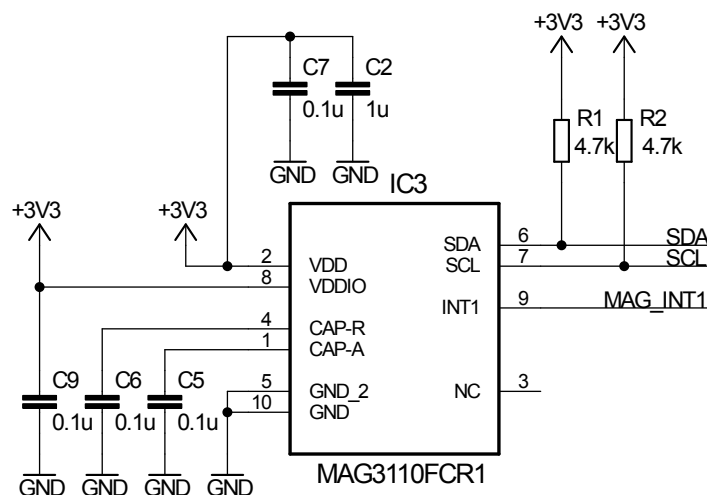
Hlavními komponenty integrovanými v obvodu jsou multiplexer sloužící pro přepínání měření v jednotlivých osách, A/D převodník, hodinový oscilátor, logika pro úpravy, napěťový regulátor spolu s napěťovou referencí a blok provádějící číslicové zpracování signálů a řízení. Blokové schéma obvodu je uvedeno na obr. 3.19.



Obr. 3.19: Blokové senzoru MAG3110, převzato z [5]

Obvod obsahuje dále registry pro kompenzaci offsetu magnetické indukce ve směrech všech os. Jedná se o Zero-Flux offset, Soft-Iron offset a Hard-Iron offset. Zero-Flux offset představuje hodnotu magnetické indukce, která by byla změřena v prostředí bez magnetického pole. Soft-Iron offset je způsoben magnetickými materiály umístěnými v blízkosti senzoru, které deformují magnetické pole. Hard-Iron offset je způsoben permanentními magnety.

3.4.3 Schéma zapojení



Obr. 3.20: Schéma zapojení senzoru MAG3110

Vývody VDD a GND slouží pro napájení obvodu. Na napájecí vývod VDD je zapotřebí připojit paralelně blokovací kondenzátory o velikostech kapacity 100 nF a 1 μ F. Na vývod CAP-A je připojen kondenzátor o velikosti kapacity 100 nF potřebný pro správnou funkci vnitřního napěťového regulátoru. Připojený kondenzátor o kapacitě 100 nF na vstupu CAP-R zajišťuje resetování senzoru. Připojené napětí na vývod VDDIO určuje napěťové logické úrovně. Na vývod VDDIO je rovněž nutné připojit kondenzátor o velikosti kapacity 100 nF. Vývody SDA a SCL jsou vývody sériového rozhraní I²C a je potřeba tyto vývody připojit přes rezistory o hodnotě odporu 4,7 k Ω na napájecí napětí.

Přerušovací výstup INT1 je aktivní ve vysoké úrovni a slouží k indikaci naměřených dat. Pokud jsou v obvodu naměřena nová data, výstup INT1 přejde z log. 0 do log. 1. Ve stavu log. 1 zůstává, dokud není přečten datový registr OUT_X_MSB. Tento výstup lze připojit na vstup vnějšího přerušování mikrokontroléru reagující na vzestupnou hranu signálu a po vyvolání přerušování číst naměřená data. Není potřeba číst stavový registr obsahující příznaky pro signalizaci nových naměřených dat. Dojde tedy ke zkrácení doby komunikace mezi senzorem a mikrokontrolérem.

3.4.4 Režimy činnosti

Obvod může pracovat ve 2 režimech činnosti: STANDBY a ACTIVE. V režimu STANDBY jsou zapnuty číslicové bloky obvodu a analogové bloky jsou vypnuty. Pro přechod do režimu ACTIVE je potřeba zapsat 0x01 do řídicího registru (CTRL_REG1 – adresa 0x11). V režimu ACTIVE jsou v činnosti všechny bloky a obvod provádí opakující se měření dle nastavené vzorkovací frekvence.

3.4.5 Komunikace s mikrokontrolérem

Tato podkapitola popisuje komunikaci mezi mikrokontrolérem a senzorem MAG3110. Jsou zde uvedeny průběhy komunikace navzorkované pomocí logického analyzátoru, z nichž je vyhodnocen naměřený vektor magnetické indukce \vec{B} .

3.4.5.1 Inicializace

Následující kroky popisují nastavení vnitřních registrů obvodu pro odesílání naměřených dat 80krát za vteřinu. Této konfiguraci odpovídá vzorkovací frekvence integrovaného A/D převodníku 1280 Hz a poměr převzorkování 16. Pro indikaci nových naměřených dat je použit výstup INT1. Tento výstup je zapojen na vstup vnějšího přerušování mikrokontroléru reagujícího na náběžnou hranu signálu.

Před konfigurací se musí senzor nacházet v režimu STANDBY. V prvním kroku je tedy nutné uvést senzor do tohoto režimu zápisem 0x00 do řídicího registru (CTRL_REG1 – adresa 0x10). Po tomto zápisu je čten stavový registr (SYSMOD – adresa 0x08) tak dlouho, dokud obvod nepřejde do režimu STANDBY. Poté je potřeba nastavit automatické resetování obvodu před každým měřením zápisem 0x80 do řídicího registru (CTRL_REG2

– adresa 0x11). Nakonec se nastaví požadovaná frekvence měření a převedení obvodu do režimu ACTIVE zápisem 0x01 do řídicího registru (CTRL_REG1 – adresa 0x11).

Následující výpis kódu představuje funkci pro inicializaci senzoru dle výše popsanych kroků.

```

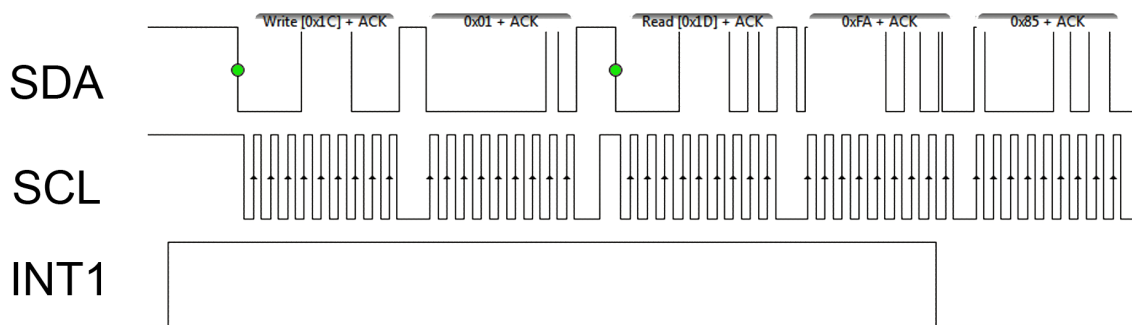
1 void MAG3110_Init(void)
2 {
3     uint8_t reg = 0x00;
4     I2C_WriteRegister(MAG3110_Address, MAG3110_CTRL_REG1, 0x00);
5     do
6     {
7         reg = I2C_ReadRegister(MAG3110_Address, MAG3110_SYSMOD);
8     }while(reg != 0x00);
9     I2C_WriteRegister(MAG3110_Address, MAG3110_CTRL_REG2, 0x80);
10    I2C_WriteRegister(MAG3110_Address, MAG3110_CTRL_REG1, 0x01);
11 }

```

3.4.5.2 Odesílání naměřených dat

Po předchozí inicializaci obvodu je prováděno měření magnetické indukce 80krát za vteřinu. Jakmile jsou nová data připravena pro čtení, obvod na výstupu INT1 přejde z nízké úrovně do vysoké úrovně. Poté lze číst naměřená data. Pro naměřená data reprezentující magnetickou indukci B_x je potřeba přečíst registry OUT_X_MSB (adresa – 0x01) a OUT_X_LSB (adresa - 0x02). Pro naměřená data reprezentující magnetickou indukci B_y je nutné přečíst registry OUT_Y_MSB (adresa – 0x03) a OUT_Y_LSB (adresa - 0x04). Pro naměřená data reprezentující magnetickou indukci B_z je zapotřebí přečíst registry OUT_Z_MSB (adresa – 0x05) a OUT_Z_LSB (adresa - 0x06).

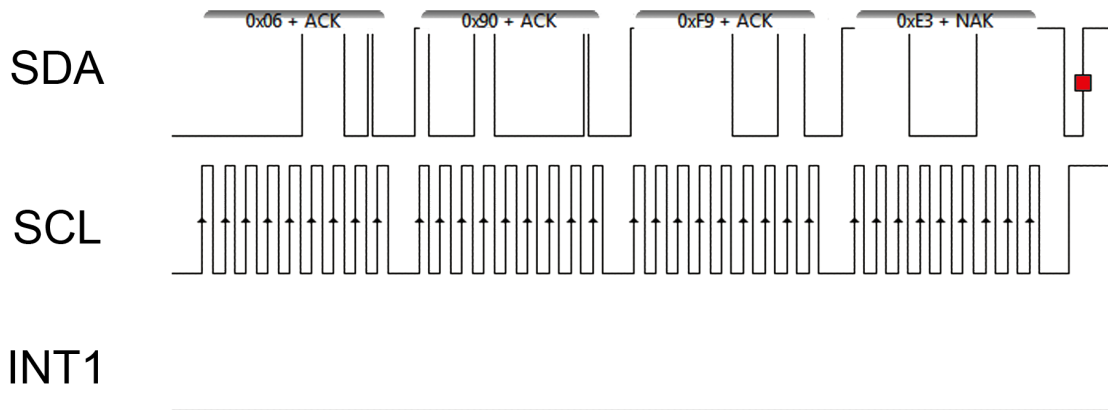
Čtení datových registrů přes rozhraní I²C je zobrazeno na obr. 3.21 a na obr. 3.22.



Obr. 3.21: Čtení datových registrů senzoru MMA3110 přes rozhraní I²C - část 1

Čtení datových registrů obsahujících naměřená data je prováděno pomocí operace zkrácené čtení více registrů senzoru popsané v kap. 3.2.3.1. Po přečtení registru OUT_X_MSB přejde výstup INT1 do log. 0. Z výše uvedeného obrázku jsou patrné obsahy datových registrů, konkrétně OUT_X_MSB (data – 0xFA), OUT_X_LSB (data – 0x85), OUT_Y_MSB (data – 0x06), OUT_Y_LSB (data – 0x90), OUT_Z_MSB (data – 0xF9) a OUT_Z_LSB (data – 0xE3).

Naměřené hodnoty magnetické indukce ve směrech všech tří os jsou reprezentovány 16 bity ve dvojkovém doplňku v desetinách μT . Pro vyjádření naměřených hodnot v jednot-



Obr. 3.22: Čtení datových registrů senzoru MMA3110 přes rozhraní I²C - část 2

kách μT je nutné získané hodnoty vydělit deseti. Z obsahů vyčtených datových registrů lze určit tyto hodnoty dle níže uvedených vztahů.

$$\begin{aligned} B_x &= ((OUT_X_MSB \ll 8) | OUT_X_LSB) \cdot \frac{1}{10} \\ &= ((0xF A \ll 8) | 0x85) \cdot \frac{1}{10} = -140,3 \quad [\mu\text{T}] \end{aligned} \quad (3.6)$$

$$\begin{aligned} B_y &= ((OUT_Y_MSB \ll 8) | OUT_Y_LSB) \cdot \frac{1}{10} \\ &= ((0x06 \ll 8) | 0x90) \cdot \frac{1}{10} = 168,0 \quad [\mu\text{T}] \end{aligned} \quad (3.7)$$

$$\begin{aligned} B_z &= ((OUT_Z_MSB \ll 8) | OUT_Z_LSB) \cdot \frac{1}{10} \\ &= ((0xF9 \ll 8) | 0xE3) \cdot \frac{1}{10} = -156,5 \quad [\mu\text{T}] \end{aligned} \quad (3.8)$$

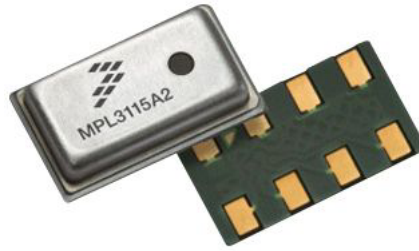
Velikost výsledného vektoru magnetické indukce \vec{B} lze určit z následujícího vztahu.

$$|\vec{B}| = \sqrt{(B_x)^2 + (B_y)^2 + (B_z)^2} = \sqrt{(-140,3)^2 + (-168,0)^2 + (-156,5)^2} = 269,1 \quad [\mu\text{T}] \quad (3.9)$$

Výsledkem měření je vektor magnetické indukce $\vec{B} = (B_x; B_y; B_z) = (-140,3; 168,0; -156,5)$ o velikosti $269,1 \mu\text{T}$.

3.5 Tlakový a teplotní senzor

Tlakový a teplotní senzor má označení MPL3115A2. Jedná se o inteligentní senzor vyrobený technologií MEMS. Výrobcem tohoto obvodu je firma Freescale Semiconductor.



Obr. 3.23: Tlakový a teplotní senzor MPL3115A2

3.5.1 Parametry

Obvod umožňuje provádět měření teploty v rozsahu od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ s přesností $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Teplota je vyjádřena se čtyřmi desetinnými místy. Dále lze pomocí tohoto senzoru měřit tlak v rozsahu od 20 kPa do 110 kPa. Senzor je kalibrován pro měření v rozsahu tlaku od 50 kPa do 110 kPa. Naměřený tlak je vyjádřen se dvěma desetinnými místy. Výrobce však udává typické rozlišení 1,5 Pa. Z hodnoty naměřeného tlaku senzor umožňuje určení nadmořské výšky. Senzor lze nakonfigurovat tak, aby odesílal přímo hodnoty nadmořské výšky. Obvod počítá nadmořskou výšku h dle následující rovnice.

$$h = K_1 \cdot \left(1 - \left(\frac{p}{p_0}\right)^{K_2}\right) \quad (3.10)$$

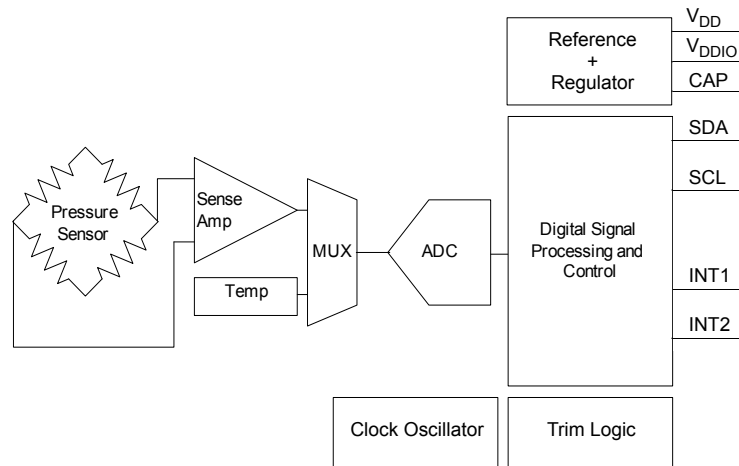
Konstanta K_1 má hodnotu 44330,77 m. Hodnota bezrozměrné konstanty K_2 je 0,1902632. Písmeno p představuje naměřenou hodnotu tlaku v Pa a písmeno p_0 označuje referenční hodnotu tlaku 101,326 kPa na mořské hladině. Dosazením krajních hodnot měřícího rozsahu tlaku do výše uvedené rovnice lze získat rozsah měřených nadmořských výšek. Hodnota tlaku 110 kPa odpovídá nadmořské výšce - 698,3 m. Hodnota tlaku 50 kPa se váže k nadmořské výšce 5574,4 m. Hodnota tlaku 20 kPa přísluší nadmořské výšce 11774,9 m. Výše uvedené hodnoty nadmořské výšky jsou zaokrouhleny na jedno desetinné místo. Výsledná nadmořská výška je vyjádřena se čtyřmi desetinnými místy. Výrobce však udává typické rozlišení 0,3 m.

Obvod umožňuje ukládání naměřených dat do vnitřní paměti typu FIFO o kapacitě pro 32 vzorků. Každý vzorek je reprezentován pěti bajty. Čas, po jehož uplynutí odesílá obvod data obsahující naměřené hodnoty nebo tato data ukládá do paměti, lze nastavit v rozmezí od 1 s do 9 hod. Časový krok v sekundách lze nastavit v mocninách dvou. Při nastavení časového kroku 9 hodin je možné do FIFO paměti ukládat vzorky až 12 dní. Proudový odběr obvodu udávaný výrobcem při měření po jedné sekundě je $40\text{ }\mu\text{A}$.

Obvod lze napájet napětím v rozmezí od 1,95 V do 3,6 V. Komunikace mezi senzorem a mikrokontrolérem probíhá přes sériové rozhraní I²C. Adresa senzoru je 0x60. Následuje-li operace čtení ze senzoru, má první odesílaný bajt hodnotu 0xC1. V případě operace zápisu je jeho hodnota 0xC0. Frekvence hodinového signálu SCL může být až 400 kHz. Výstupní logické úrovně tohoto obvodu jsou nastavitelné v rozpětí od 1,6 V do 3,6 V. Obvod je schopen provozu v teplotním rozsahu od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$. Obvod je umístěn v pouzdře LGA s osmi vývody o rozměrech 5 x 3 x 1,1 mm.

3.5.2 Blokové schéma

Hlavními komponenty integrovanými v obvodu jsou senzor pro měření tlaku, senzor pro měření teploty, multiplexer, A/D převodník, napěťový regulátor a napěťová reference, blok provádějící číslicové zpracování signálů a řízení, hodinový oscilátor a logika pro úpravy. Blokové schéma obvodu tlakového a teplotního senzoru je uvedeno na obr. 3.24.



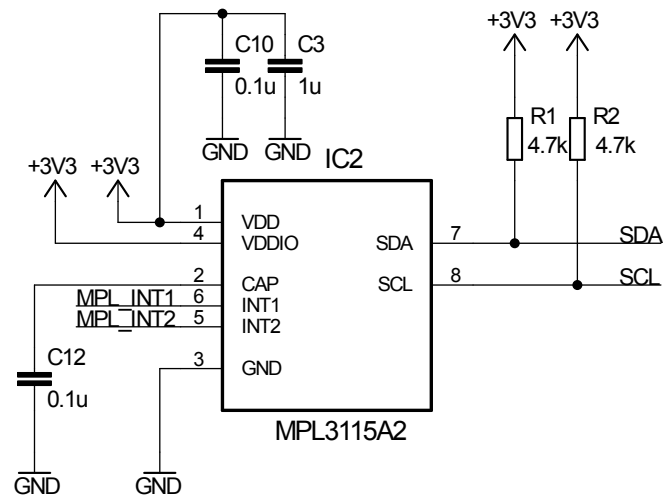
Obr. 3.24: Blokové schéma senzoru MPL3115A2, převzato z [4]

3.5.3 Schéma zapojení

Vývody VDD a GND slouží pro napájení obvodu. Na napájecí vývod VDD je zapotřebí připojit paralelně blokovací kondenzátory o velikostech kapacity 100 nF a 10 μ F. Na vývod CAP je připojen kondenzátor o velikosti kapacity 100 nF potřebný pro správnou funkci vnitřního napěťového regulátoru. Připojené napětí na vývod VDDIO určuje napěťové logické úrovně. Vývody SDA a SCL jsou vývody sériového rozhraní I²C a je potřeba tyto vývody připojit přes rezistory o hodnotě odporu 4,7 k Ω na napájecí napětí. Obvod má dva nezávislé přerušovací výstupy INT1 a INT2. Tyto výstupy mohou být dle nastavení buď typu otevřený kolektor nebo push-pull. Dále lze stanovit, zda bude daný výstup aktivní v log. 1 nebo v log. 0. Uživatel má na výběr z několika možností konfigurace přechodu těchto výstupů do aktivního stavu. Mezi tyto možnosti patří překročení nastavené prahové hodnoty, pohyb naměřené hodnoty uvnitř nastaveného okna kolem této hodnoty, změna sekvenčně měřené hodnoty o více než nastavenou šířku okna, indikace nových naměřených dat, indikace přetečení vnitřní FIFO paměti a oznámení dosažení počtu vzorků v paměti určité nastavitelné hodnoty.

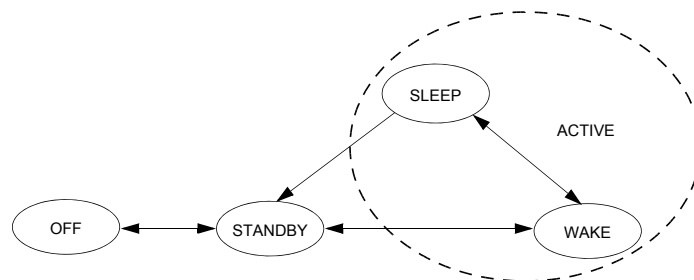
3.5.4 Režimy činnosti

Obvod může pracovat ve 3 režimech činnosti: OFF, ACTIVE a STANDBY. V režimu OFF je obvod, pokud k němu není připojeno napájecí napětí. Po přivedení napájecího



Obr. 3.25: Schéma zapojení senzoru MPL3115A2

napětí přejde obvod do režimu STANDBY. Pro následující přechod do režimu ACTIVE je potřeba zapsat do vnitřního řídicího registru (CTRL_REG1 – adresa 0x26). V režimu ACTIVE senzor provede měření, uloží změřené hodnoty do patřičných registrů a automaticky přejde do režimu STANDBY. Další přechod do režimu STANDBY je prováděn automaticky dle nastaveného času mezi prováděním měření. Přechod mezi stavy je znázorněn na obr. 3.26.



Obr. 3.26: Přechod mezi jednotlivými režimy činnosti senzoru MPL3115A2, převzato z [4]

3.5.5 Komunikace s mikrokontrolérem

Tato podkapitola popisuje komunikaci mezi mikrokontrolérem a senzorem MPL3115A2. Jsou zde uvedeny průběhy komunikace navzorkované pomocí logického analyzátoru, z nichž jsou vyhodnoceny naměřené hodnoty tlaku p a teploty T .

3.5.5.1 Inicializace

Následující kroky popisují nastavení vnitřních registrů obvodu pro měření tlaku a teploty každé dvě vteřiny. Poměr převzorkování je zvolen 128. Pro indikaci nových dat je použit výstup INT2 konfigurovaný jako push-pull aktivní v nízké logické úrovni. Tento výstup

je připojen na vstup vnějšího přerušení mikrokontroléru reagujícího na doběžnou hranu signálu.

Nejprve je nutné provést reset obvodu zápisem 0x04 do řídicího registru (CTRL_REG1 – adresa 0x26). Po tomto zápisu je doporučeno přečíst tento registr a ověřit, zda byl obvod opravdu resetován. Poté jsou povoleny příznakové bity indikující, že jsou změřená data připravena pro čtení. Povolení se provede zápisem 0x07 do řídicího registru (PT_DATA_CFG – adresa 0x13). Použití výstupu INT2 se povolí zápisem 0x00 do řídicího registru (CTRL_REG5). Dále je potřeba tento výstup nakonfigurovat jako push-pull aktivní v nízké logické úrovni. Konfigurace se provede zápisem 0x00 do řídicího registru (CTRL_REG3 – adresa 0x28). Povolení indikace nových dat je rovněž nutné zapsat 0x80 do řídicího registru (CTRL_REG4 – adresa 0x29). V dalším kroku se nastavuje čas, po jehož uplynutí bude senzor provádět měření. Měření po 2 vteřinách se nastaví zápisem 0x01 do řídicího registru (CTRL_REG2 – adresa 0x27). Nakonec se nastaví poměr převzorkování, měření tlaku a přechod obvodu do režimu ACTIVE zápisem 0x39 do řídicího registru (CTRL_REG1 – adresa 0x26). Následující výpis kódu představuje funkci pro inicializaci senzoru dle výše popsaných kroků.

```

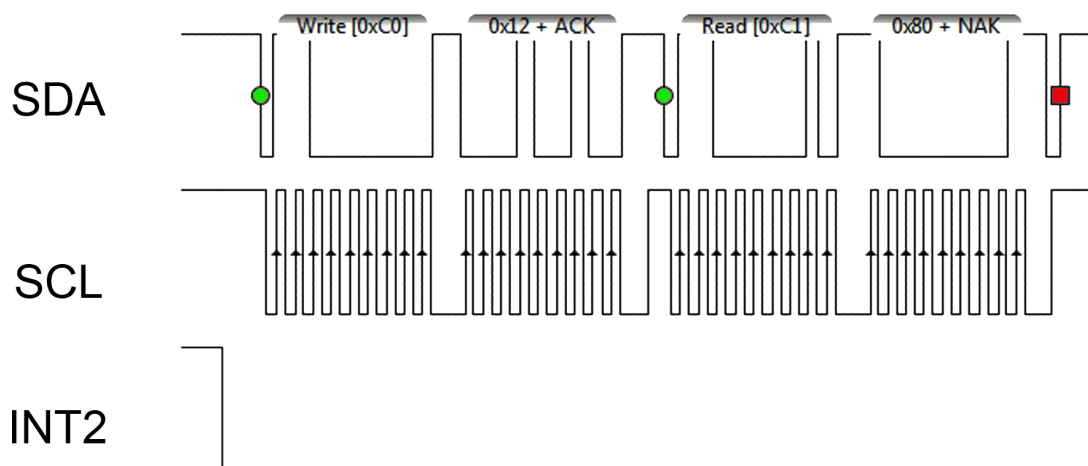
1 void MPL3115A2_Interrupt_Init(void)
2 {
3     uint8_t reg = 0x00;
4     I2C_WriteRegister(MPL3115A2_Address, MPL3115A2_CTRL_REG1, 0x04);
5     do
6     {
7         reg = I2C_ReadRegister(MPL3115A2_Address, MPL3115A2_CTRL_REG1) & 0x04;
8     }while(reg);
9     I2C_WriteRegister(MPL3115A2_Address, MPL3115A2_PT_DATA_CFG, 0x07);
10    I2C_WriteRegister(MPL3115A2_Address, MPL3115A2_CTRL_REG5, 0x00);
11    I2C_WriteRegister(MPL3115A2_Address, MPL3115A2_CTRL_REG3, 0x00);
12    I2C_WriteRegister(MPL3115A2_Address, MPL3115A2_CTRL_REG4, 0x80);
13    I2C_WriteRegister(MPL3115A2_Address, MPL3115A2_CTRL_REG2, 0x01);
14    I2C_WriteRegister(MPL3115A2_Address, MPL3115A2_CTRL_REG1, 0x39);
15 }
```

3.5.5.2 Odesílání naměřených dat

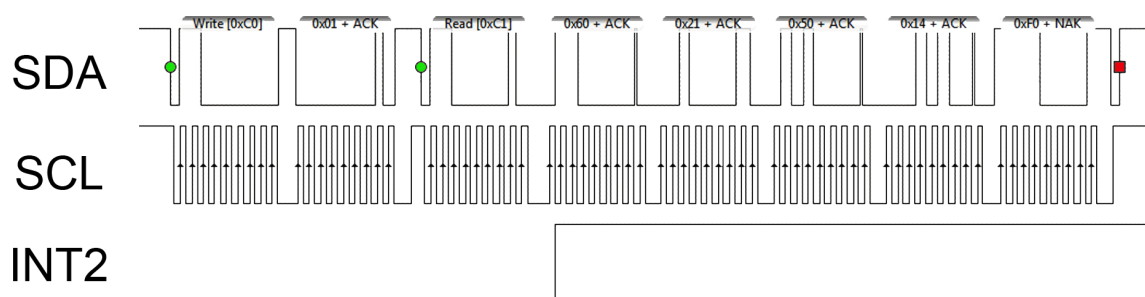
Po předchozí inicializaci obvodu je prováděno měření teploty a tlaku každé dvě vteřiny. Jakmile jsou nová data připravena pro přečtení, přerušovací výstup INT2 přejde z vysoké úrovně do nízké úrovně. Poté je potřeba přečíst stavový registr (INT_SOURCE – adresa 0x12). Pokud je v jeho obsahu indikováno, že bylo přerušení vyvoláno novými naměřenými daty (data – 0x80), lze tato data číst. Pro naměřená data reprezentující tlak je potřeba číst registry OUT_P_MSB (adresa – 0x01), OUT_P_CSB (adresa - 0x02) a OUT_P_LSB (adresa - 0x03). Pro naměřená data reprezentující teplotu je potřeba vyčíst registry OUT_T_MSB (adresa - 0x04) a OUT_T_LSB (adresa - 0x05).

Průběh čtení stavového registru (INT_SOURCE) přes rozhraní I²C je znázorněn na obr. 3.27. Čtení datových registrů přes rozhraní I²C je zobrazeno na obr. 3.28.

Čtení datových registrů obsahujících naměřená data je prováděno pomocí operace zkrácené čtení více registrů senzoru popsané v kap. 3.2.3.1. Přerušovací výstup INT2 přejde do neaktivní úrovně při čtení datového registru OUT_P_MSB. Z výše uvedeného



Obr. 3.27: Průběh čtení stavového registru (INT_SOURCE) senzoru MPL3115A2 přes rozhraní I²C



Obr. 3.28: Čtení datových registrů senzoru MPL3115A2 přes rozhraní I²C

obrázku jsou patrné obsahy datových registrů, konkrétně OUT_P_MSB (data – 0x60), OUT_P_CSB (data – 0x21), OUT_P_LSB (data – 0x50), OUT_T_MSB (data – 0x14) a OUT_T_LSB (data – 0xF0).

Z obsahů datových registrů lze dle níže uvedených vztahů dopočítat naměřenou hodnotu tlaku p a teploty T .

$$T = (((OUT_T_MSB \ll 8) | (OUT_T_LSB \& 0xF0)) \gg 4) \cdot 0,0625 \quad (3.11)$$

$$= (((0x14 \ll 8) | (0xF0 \& 0xF0)) \gg 4) \cdot 0,0625 = 20,9375 \quad [^{\circ}C]$$

$$p = ((OUT_P_MSB \ll 16) | (OUT_P_CSB \ll 8) | (OUT_P_LSB \& 0xC0)) \gg 6) \quad (3.12)$$

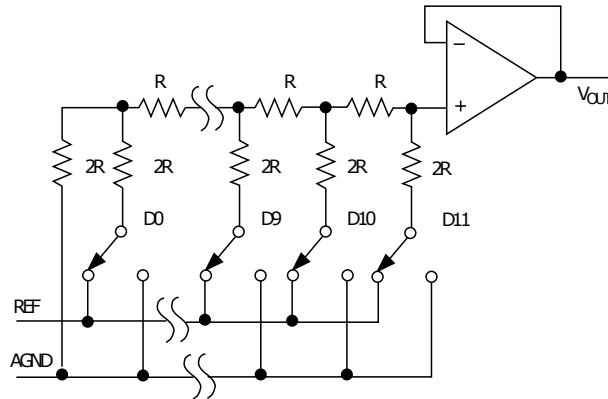
$$+ ((OUT_P_LSB \& 0x30) \gg 4) \cdot 0,25 = ((0x60 \ll 16) | (0x21 \ll 8) | (0x50 \& 0xC0)) \gg 6)$$

$$+ ((0x50 \& 0x30) \gg 4) \cdot 0,25 = 98501 \quad [Pa]$$

Výsledkem měření jsou teplota o velikosti 20,9375 °C a tlak o velikosti 98501 Pa.

3.6 D/A převodník

Použitý D/A převodník má označení MAX537AEWE+. Jedná se o čtyřkanalový 12bitový D/A převodník s rezistorovou sítí R/2R s napěťovým výstupem. Výrobce tohoto obvodu je firma Maxim Integrated.



Obr. 3.29: D/A převodník s rezistorovou sítí s napěťovým výstupem, převzato z [6]

3.6.1 Parametry

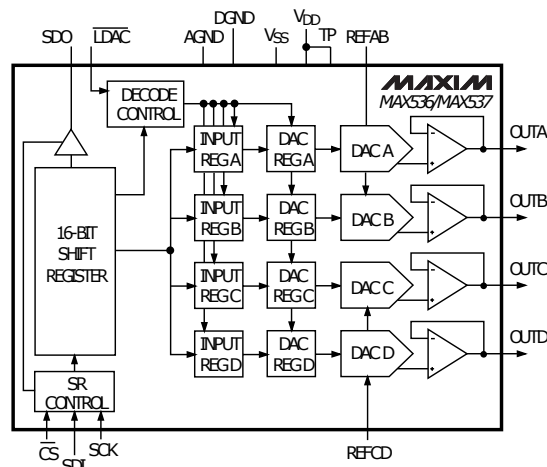
Mezi parametry použitého převodníku patří: integrální nelinearita $\pm 0,5$ LSB, diferenciální nelinearita ± 1 LSB, offset ± 7 mV a chyba zisku $\pm 1,5$ LSB. Všechny výše uvedené parametry jsou maximální hodnoty. Celková doba od změny vstupního kódu do ustálení analogového výstupu s přesností na $\pm 0,5$ LSB je typicky $5 \mu\text{s}$.

Převodník lze napájet kladným napájecím napětím v rozsahu od 4,5 V do 5,5 V a záporným napájecím napětím v rozsahu od -4,5 V do 4,5 V. Referenční napětí může být maximálně rozdíl kladného napájecího napětí a 2,2 V. Impedance referenčního vstupu je závislá na kódu. Její minimální garantovaná hodnota je $5 \text{ k}\Omega$ (při kódu 0x555). Typické hodnoty proudového odběru z kladného a záporného napájecího napětí jsou 5,5 mA a -4,7 mA. Obvod je schopen v provozu v teplotním rozsahu od $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ do $85 \text{ }^\circ\text{C}$. Komunikace mezi mikrokontrolérem a převodníkem probíhá přes sériové rozhraní SPI. Obvod je integrován v pouzdře SO-16.

3.6.2 Blokové schéma

Obvod vlastní na svém vstupu 16bitový posuvný registr. Z toho registru jsou přijatá data přesunuta do dalších registrů jednotlivých kanálů. Každý kanál z celkového počtu čtyř kanálů obsahuje vyrovnávací paměť skládající se z vstupního a DAC registru a samotný D/A převodník. Jelikož obvod neobsahuje vnitřní napěťovou referenci, je zapotřebí připojit k převodníku externí zdroj referenčního napětí. Kanály A a B sdílí společný vstup pro referenční napětí REFAB, kanály C a D sdílí společný vstup pro referenční napětí

REFCD. Vývody SDO, SDI, SCK a $\overline{\text{CS}}$ jsou vývody sériového rozhraní SPI. Vývod $\overline{\text{LDAC}}$ slouží k okamžité aktualizaci výstupů D/A převodníků.



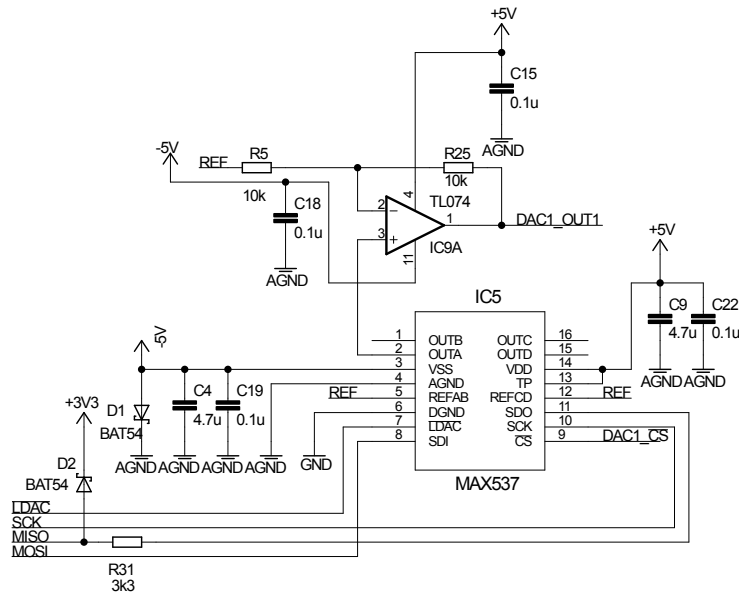
Obr. 3.30: Blokové schéma D/A převodníku MAX537, převzato z [6]

3.6.3 Schéma zapojení

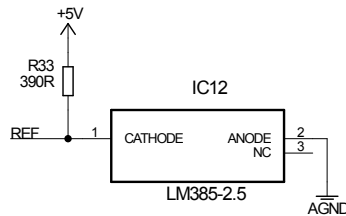
Vstupy použitého mikrokontroléru nejsou tolerantní k napěťovým úrovním převodníku kvůli rozdílným napájecím napětím. Proto je vodič SDO připojen přes rezistor R31 a Schottkyho diodu D2 na napětí + 3,3 V. Tím je vlastně ošetřeno, že se na vstupu mikrokontroléru MISO neobjeví nikdy vyšší napětí než + 3,3 V. Zbylé vodiče sériového rozhraní SPI jsou propojeny přímo, protože vstupy převodníku jsou kompatibilní s výstupními napěťovými úrovněmi mikrokontroléru. Obě napájecí napětí převodníku jsou blokována a filtrována pomocí paralelní kombinace kondenzátorů o kapacitách 4,7 μF a 100 nF. Při možnosti sekvenčního připojení napájení se nejprve připojí záporné napájecí napětí VSS, pak kladné napájecí napětí VDD a nakonec referenční napětí. Toto v zařízení není zajištěno, proto je mezi VSS a analogovou zem AGND připojena Schottkyho dioda dle doporučení výrobce.

Výstupy převodníku jsou samy o sobě unipolární. Pro požadavek bipolárních výstupů je nutné na výstupy připojit operační síť. Operační zesilovač byl zvolen TL074. Napájecí napětí operačního zesilovače jsou blokována pomocí připojených kondenzátorů o kapacitách 100 nF. Na schématu zapojení (obr. 3.31) je z důvodu přehlednosti tato síť zobrazena jen na výstupu OUTA.

D/A převodníky neobsahují vnitřní napěťovou referenci a je tedy nutné k nim připojit zdroj referenčního napětí. Referenční napětí bylo zvoleno 2,5 V a je zajištěno prostřednictvím napěťové reference LM385 v pouzdře SOT-23. Hodnota předřadného odporu pro tuto referenci byla zvolena s ohledem na maximální proudový odběr přibližně 6 mA.



Obr. 3.31: Schéma zapojení D/A převodníku MAX537

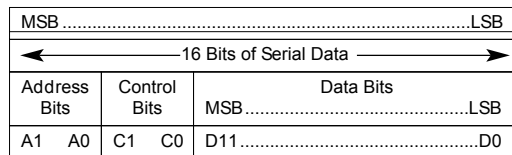


Obr. 3.32: Schéma zapojení napěťové reference LM385

3.6.4 Komunikace s mikrokontrolérem

3.6.4.1 Popis komunikace

Mikroprocesor komunikuje s převodníkem pomocí 16bitových příkazů. Příkazy jsou odesílány nejvýše významným bitem MSB napřed. Příkaz obsahuje 2 adresové bity, 2 řídicí bity a 12 datových bitů. Formát řídicího příkazu je uveden na obr. 3.33.



Obr. 3.33: Formát příkazu D/A převodníku, převzato z [6]

Adresové bity slouží pro rozlišení, do registru kterého kanálu se 12bitová data přesunou. Kanál A má adresu 0b00. Kanál B je adresován pomocí 0b01. Kanál C vlastní adresu 0b02. Kanál D je adresován prostřednictvím adresy 0b03. Řídicí bity v kombinaci se signálem $\overline{\text{LDAC}}$ rozhodují, do kterých registrů se zapíše data z vstupního posuvného registru a zda-li dojde k aktualizaci výstupů převodníku.

Je-li $\overline{\text{LDAC}}$ v log. 0 a řídicí bity 0bX1, dojde k okamžité aktualizaci daného výstupu převodníků dle čísla ve vstupním posuvném registru. Pokud je $\overline{\text{LDAC}}$ v log. 1 a řídicí bity jsou 0b01, pak jsou data zapsána jen do vstupního registru daného kanálu a výstupy zůstávají nezměněny. V aplikaci jsou nejdříve požadovaná data zapsána do vstupních registrů všech kanálů převodníku. Poté jsou všechny výstupy jednotlivých kanálů aktualizovány najednou. Toho lze docílit softwarově odesláním příkazu 0b0X10XXXXXXXXXXXX nebo hardwarově pomocí doběžné hrany signálu $\overline{\text{LDAC}}$. Druhý způsob je rychlejší a je v aplikaci využíván.

Příkazem lze rovněž nastavit, zda-li se budou data z posuvného registru převodníku odesílat při náběžné (výchozí nastavení – používáno) nebo doběžné hraně hodinového signálu SCK. Výčet všech 17 možných příkazů lze nalézt v katalogovém listu převodníku ([6]).

Na obr. 3.34 jsou uvedeny výpočty výstupního napětí dle vstupního kódu v případě unipolárního a bipolárního výstupu převodníku.

DAC CONTENTS			ANALOG OUTPUT	DAC CONTENTS			ANALOG OUTPUT
MSB	LSB			MSB	LSB		
1111	1111	1111	$+V_{\text{REF}} \left(\frac{4095}{4096} \right)$	1111	1111	1111	$+V_{\text{REF}} \left(\frac{2047}{2048} \right)$
1000	0000	0001	$+V_{\text{REF}} \left(\frac{2049}{4096} \right)$	1000	0000	0001	$+V_{\text{REF}} \left(\frac{1}{2048} \right)$
1000	0000	0000	$+V_{\text{REF}} \left(\frac{2048}{4096} \right) = \frac{+V_{\text{REF}}}{2}$	1000	0000	0000	0V
0111	1111	1111	$+V_{\text{REF}} \left(\frac{2047}{4096} \right)$	0111	1111	1111	$-V_{\text{REF}} \left(\frac{1}{2048} \right)$
0000	0000	0001	$+V_{\text{REF}} \left(\frac{1}{4096} \right)$	0000	0000	0001	$-V_{\text{REF}} \left(\frac{2047}{2048} \right)$
0000	0000	0000	0V	0000	0000	0000	$-V_{\text{REF}} \left(\frac{2048}{2048} \right) = -V_{\text{REF}}$

(a) Unipolární výstup

(b) Bipolární výstup

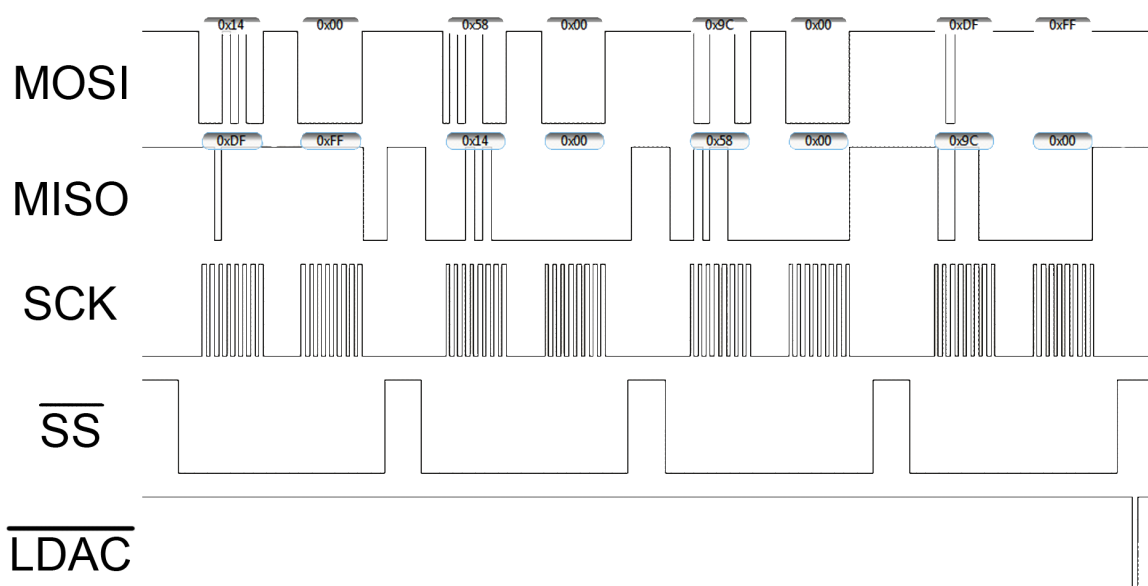
Obr. 3.34: Výpočet výstupního napětí D/A převodníku dle vstupního kódu, převzato z [6]

3.6.4.2 Příklad komunikace

Na obr. 3.35 je zobrazen průběh komunikace mikroprocesoru s převodníkem. Při zápisu do vstupního posuvného registru převodníku je nutné nejprve aktivovat $\overline{\text{CS}}$, dále odeslat vyšší bajt příkazu a poté nižší bajt příkazu. Poté je nutné převést $\overline{\text{CS}}$ do log. 1. Náběžná hrana signálu $\overline{\text{CS}}$ zajistí vykonání příkazu. Při odesílání dat mikrokontrolér zároveň přijímá dříve zapsaná data z převodníku a lze tak diagnostikovat, zda byla požadovaná data skutečně odeslána. Rovněž lze po přijetí všech 16bitových předchozích dat převést $\overline{\text{CS}}$ do log. 1 s tím, že odesílaná data z mikrokontroléru jsou již všechna zachycena ve vstupním registru převodníku.

Do kanálu A jsou odeslána data pro čtvrtinu rozsahu převodníku ($1024 = 0x400$), do kanálu B pro polovinu rozsahu převodníku ($2048 = 0x800$), do kanálu C pro tři čtvrtiny rozsahu převodníku ($3072 = 0xC00$) a do kanálu D pro celý rozsah převodníku ($4095 = 0xFFFF$). Všechna odesílaná data jsou postupně zapsána do vstupních registrů všech

kanálů a poté jsou výstupy společně hardwarově aktualizovány doběžnou hranou signálu $\overline{\text{LDAC}}$.

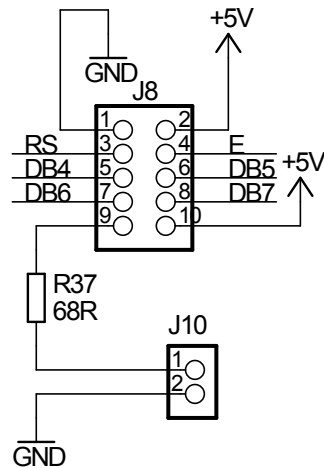


Obr. 3.35: Příklad komunikace mikroprocesoru s D/A převodníkem

3.7 LCD displej

Pro zobrazení měřených dat a informování obsluhy byl zvolen čtyřřádkový alfanumerické LCD displej s řadičem HD44780. Na každé řádce lze zobrazit 20 znaků. Displej umožňuje komunikaci s mikrokontrolérem po osmi (DB0 – DB7) nebo čtyřech datových vodičích (DB4 – DB7). V případě komunikace po čtyřech vodičích probíhá zápis nadvakrát. Nejdříve se odešle horní a pak dolní polovina bajtu. Byla zvolena čtyřbitová komunikace z důvodu úspory vývodů mikrokontroléru a menších rozměrů konektoru. Displej kromě těchto datových vodičů obsahuje ještě vývody pro připojení napájení a země, nastavení kontrastu, podsvícení a vývody 3 řídicích signálů – RS (výběr přenosu dat nebo příkazu), R/\overline{W} (čtení nebo zápis dat) a E (povolovací vstup). Vývod sloužící pro nastavení kontrastu je připojen na jezdec potenciometru. Podsvícení displeje lze vyjmutím zkratovací propojky vypnout a podstatně tak snížit odběr zařízení. Vývod R/\overline{W} je trvale uzemněn, protože se do displeje jen zapisuje. Konektor pro připojení displeje je na obr. 3.36.

Displej obsahuje 2 paměti: DD RAM a CG RAM. Paměť DD RAM obsahuje znaky, které je možno zobrazit na displeji. Displej má platné adresy pro první řádek: 0x00 – 0x13, druhý řádek: 0x40 až 0x53, třetí řádek: 0x14 až 0x27 a čtvrtý řádek: 0x54 až 0x67. Adresa se nastavuje prostřednictvím 7 bitů. Bit MSB je v log. 1. Vzhledem k použité komunikaci po čtyřech datových vodičích je nutné poslat příkaz pro nastavení adresy nadvakrát. Paměť CG RAM slouží k vytvoření až osmi uživatelských znaků. Tato paměť není v aplikaci využita.



Obr. 3.36: Konektor pro připojení LCD displeje

Zápis prostřednictvím 4bitové komunikace probíhá vybavením řídicího signálu RS, podle toho, zda se jedná o data (log. 1) nebo o příkaz (log. 0). Dále přejde řídicí signál E do log. 1 a na datové signály DB7-DB4 se přivede horní polovina bajtu. Tato data se potvrdí přechodem signálu E do log. 0. Poté přejde signál E opět do log. 1, na datové signály se přivede dolní polovina bajtu a opět se potvrdí přechodem signálu E do log. 0.

Před samotným zobrazováním znaků je displej potřeba inicializovat. Jedná se o sekvenci příkazů jako například nastavení 4bitové komunikace, konfigurace počtu řádků displeje, smazání displeje, zapnutí displeje, inkrementace adresy a tak dále. Výčet všech potřebných inicializačních kroků lze nalézt v katalogovém listu řadiče HD44780 (??).

Pro zobrazení znaku na displeji je nejprve nutné nastavit pozici pomocí odpovídající adresy DD RAM. V dalším kroku se odešle v ASCII kódu kód znaku, který chce uživatel zapsat na pozici odpovídající nastavené adrese. Při inicializaci displeje byla nastavena automatická inkrementace adresy. Pro zobrazení řetězce znaků tedy stačí nastavit jen adresu prvního znaku. Jednotlivé znaky v řetězci se poté zobrazí na pozicích za sebou.

4

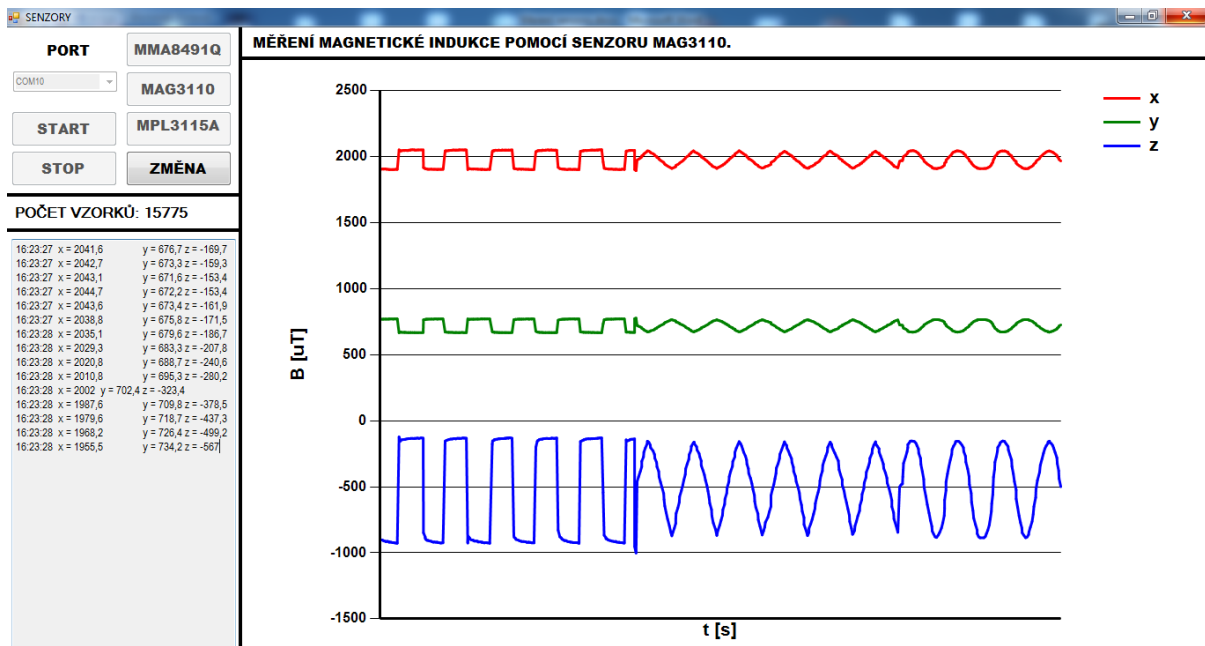
Návrh systému z hlediska programového vybavení

Tato kapitola popisuje dvě aplikace pro osobní počítač. První aplikace slouží k vizualizaci a ukládání dat ze senzorů a je pojmenována SENZORY. Druhá aplikace umožňuje ovládání generátoru EKG signálů a je nazvána GENERÁTOR. Obě aplikace byly vytvořeny ve vývojovém prostředí Visual Studio 2012 v jazyce C# . Součástí této kapitoly jsou rovněž vývojové diagramy jednotlivých částí programu mikrokontroléru a popis komunikace mezi mikrokontrolérem a osobním počítačem v těchto aplikacích.

4.1 Aplikace SENZORY

4.1.1 Popis aplikace

Aplikace obsahuje celkem šest tlačítek, pole výběru, graf a čtyři popisky. Tlačítka jsou postupně povolována a zakazována kvůli tomu, aby se ošetřily případné chyby a zamezilo se nechtěnému pádu programu. Nejprve je nutné pomocí pole výběru umístěného pod popiskem PORT vybrat komunikační port, ke kterému je připojeno zařízení. Kliknutím na tlačítko START dojde k otevření portu. Tlačítko STOP slouží k uzavření portu. Po otevření portu lze vybrat pomocí tří tlačítek, který senzor bude měřit a jehož naměřené vzorky bude mikrokontrolér odesílat do počítače. V jednu chvíli může být prováděno měření jen pomocí jednoho senzoru a prostřednictvím tlačítka ZMĚNA lze přepínat mezi jednotlivými senzory. Graf slouží pro orientační vizualizaci příchozích vzorků v reálném čase. Všechny přijímané vzorky jsou ukládány do textových souborů, ale v grafu je zobrazováno vždy maximálně 25 vzorků za vteřinu, aby nedocházelo ke zbytečnému zatěžování výpočetního systému. Popisek nad grafem slouží k informování obsluhy aplikace. Popisek vlevo od grafu vypisuje přijaté vzorky a čas, kdy byly vzorky zpracovány. Nad tímto popiskem je ještě jeden popisek, který zobrazuje, z kolika měření byly vzorky uloženy do textového souboru. Grafický snímek obrazovky zachycující aplikaci při ovládání měření magnetické indukce pomocí senzoru MAG3110 je uveden na obr. 4.1.



Obr. 4.1: Grafický snímek obrazovky zachycující aplikaci SENZORY

Po stisknutí tlačítka vybraného senzoru dojde k přečtení konfiguračního souboru. Tento soubor je označen X_config.txt, kde X označuje, o jaký senzor se jedná. Konfigurační soubor obsahuje nastavitelné parametry grafu. Mezi tyto parametry patří minimum a maximum osy y a rozsah osy x v sekundách, po jehož uplynutí se vykreslené vzorky začnou postupně zleva umazávat a zprava přidávat. Dále soubor obsahuje číslo, které je po přečtení odesíláno do mikrokontroléru a slouží pro nastavení vzorkovací frekvence daného senzoru. U akcelerometru (MMA) může být vzorkovací frekvence nastavena na hodnotu 300; 100; 50; 25; 20; 10; 5; 4; 2 a 1 Hz. Senzoru magnetického pole (MAG) lze konfigurovat pro měření vzorků frekvencí 80; 40; 20; 10; 5; 2,5; 1,25; 0,63; 0,31; 0,16 a 0,08 Hz. U tlakového a teplotního senzoru (MPL) se nenastavuje frekvence, ale vzorkovací perioda v sekundách. Pro ilustraci je na obr. 4.2 zobrazen konfigurační soubor senzoru magnetického pole.

```

1          /*vzorkovací frekvence viz TABULKA nize */
15         /*Osa x - rozsah v sekundach */
0          /*Osa y - minimum */
0          /*Osa y - maximum, max a min = 0 -> auto*/
-----
TABULKA (cislo ... vzorkovací frekvence v Hz)
-----
1 ... 80.00
2 ... 40.00
3 ... 20.00
4 ... 10.00
5 ... 5.00
6 ... 2.50
7 ... 1.25
8 ... 0.63
9 ... 0.31
10 ... 0.16
11 ... 0.08
    
```

Obr. 4.2: Konfigurační textový soubor MAG_config.txt senzoru magnetického pole

Naměřené vzorky jsou ukládány do textového souboru X_data.txt. Na prvním řádku

jsou uvedeny popisky. Jednotlivé vzorky jsou v řádku odděleny jsou odděleny tabulátorem, nové vzorky jsou vždy uloženy na následující řádek. Textový soubor obsahující naměřené vzorky magnetické indukce je uveden na obr. 4.3.

Bx	By	Bz
2042.1	676	-178.8
2007	697.8	-294.5
1955.9	733.3	-556.5
1924.1	758.6	-798.8
1922.3	759.2	-815.8
1950.7	740	-634
1996.8	705.7	-367.9
2038.6	678.1	-191
2037.6	677.6	-182.3
2004.2	702.2	-319.3
1951.7	737.9	-592.6
1922.1	759.5	-817.1
1924.7	757.8	-800.6
1954.9	735.9	-599.7
2003	701.3	-338
2039.8	676	-182.3
2033.7	679.4	-192.4
1996.4	705.2	-346.1

Obr. 4.3: Textový soubor MAG_data.txt obsahující naměřené vzorky magnetické indukce

4.1.2 Komunikace mezi mikrokontrolérem a osobním počítačem

Komunikace mezi mikrokontrolérem a osobním počítačem probíhá pomocí sériového rozhraní UART. Komunikace probíhá po jednotlivých bajtech modulační rychlostí 115200 Bd. Mikrokontrolér přijímá jednotlivé bajty dat nebo pakety složené z jednotlivých bajtů dat a odesílá pakety dat. Pakety dat odesílané mikrokontrolérem mají vždy pevnou délku o velikosti 10 bajtů. Tyto pakety obsahují proměnné daného datového typu skládající se z více bajtů, které bylo potřeba rozdělit na jednotlivé bajty. Tyto proměnné jsou odesílány nejnižším bytem napřed kvůli reprezentaci vícebajtových hodnot typu Little Endian.

4.1.2.1 Přijímaná data mikrokontrolérem

Před spuštěním měření různých fyzikálních veličin pomocí jednotlivých senzorů je potřeba nastavit frekvenci, s jakou bude dále zvolený senzor měřit vzorky, které mikrokontrolér vyhodnotí a odešle do osobního počítače. Nastavení se provádí odesláním paketu dat složeného ze dvou bajtů. První bajt obsahuje hexadecimální kód 34 a slouží pouze pro identifikaci, že další bajt bude obsahovat číslo přečtené z konfiguračního textového souboru příslušného senzoru. Číslo reprezentuje frekvenci vzorkování.

0x34	číslo
------	-------

Tab. 4.1: Paket dat pro nastavení vzorkovací frekvence senzorů

Pro spuštění měření příslušných fyzikálních veličin pomocí senzorů je potřeba do mikrokontroléru odeslat jeden bajt, který určuje, jaký senzor bude měřit. Pro spuštění měření vektoru zrychlení pomocí senzoru MMA8491Q je nutné odeslat bajt obsahující hexadecimální kód 31. Pro spuštění měření vektoru magnetické indukce pomocí senzoru MAG3110

je nutné odeslat bajt obsahující hexadecimální kód 32. Pro spuštění měření teploty a tlaku pomocí senzoru MPL3115A2 je nutné odeslat bajt obsahující hexadecimální kód 33. Pro ukončení měření a případnou následnou změnu senzoru je potřeba do mikrokontroléru odeslat bajt obsahující hexadecimální kód 30. Po odeslání tohoto bajtu se dokončí právě probíhající měření. Mikrokontrolér dále čeká na paket dat pro nastavení frekvence vzorkování a dále na bajt obsahující kód příslušející spuštění měření pomocí zvoleného senzoru.

Akce	Hexadecimální kód
Změna senzoru	30
Měření zrychlení pomocí senzoru MMA8491Q	31
Měření magnetické indukce pomocí senzoru MAG3110	32
Měření teploty a tlaku pomocí senzoru MPL3115A2	33

Tab. 4.2: Přijímané bajty mikrokontrolérem v aplikaci SENZORY

4.1.2.2 Odesílaná data mikrokontrolérem

Mikrokontrolér odesílá pakety dat o pevné délce o velikosti 10 bajtů. První bajt obsahuje hexadecimální kód FF a označuje začátek paketu dat. Poslední bajt obsahuje hexadecimální kód FE a označuje konec paketu dat. V případě, že mají odesílaná data velikost menší než 8 bajtů (po odečtení bajtů určujících začátek a konec paketu), jsou nevyužité bajty vyplněny hexadecimálním kódem 0x00.

Odesílaný paket dat při měření zrychlení je zobrazen v tab. 4.3. Paket obsahuje celkem 6 datových bajtů, 2 bajty označující začátek a konec paketu a 2 nevyužité bajty. Bajty a_{x_1} (nižší) a a_{x_2} (vyšší) tvoří dohromady zrychlení a_x , Bajty a_{y_1} (nižší) a a_{y_2} (vyšší) tvoří dohromady zrychlení a_y . Bajty a_{z_1} (nižší) a a_{z_2} (vyšší) tvoří dohromady zrychlení a_z . Zrychlení ve směrech všech tří os jsou reprezentována číslem datového typu short (znaménkový celočíselný 16bitový typ). Číslo 1024 odpovídá zrychlení o velikosti 1 g.

0xFF	a_{x_1}	a_{x_2}	a_{y_1}	a_{y_2}	a_{z_1}	a_{z_2}	0x00	0x00	0xFE
------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	------	------	------

Tab. 4.3: Paket dat obsahující vektor zrychlení změřený senzorem MMA8491Q

Odesílaný paket dat při měření magnetické indukce je uveden v tab. 4.4. Paket obsahuje celkem 6 datových bajtů, 2 bajty označující začátek a konec paketu a 2 nevyužité bajty. Bajty B_{x_1} (nižší) a B_{x_2} (vyšší) tvoří dohromady magnetickou indukci B_x . Bajty B_{y_1} (nižší) a B_{y_2} (vyšší) tvoří dohromady magnetickou indukci B_y . Bajty B_{z_1} (nižší) a B_{z_2} (vyšší) tvoří dohromady magnetickou indukci B_z . Magnetická indukce ve směru všech os je reprezentována číslem datového typu short v desetínách jednotky μT . Pro vyjádření magnetické indukce v jednotkách μT je nutné číslo vydělit deseti.

0xFF	B_x_1	B_x_2	B_y_1	B_y_2	B_z_1	B_z_2	0x00	0x00	0xFE
------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	------	------	------

Tab. 4.4: Paket dat obsahující vektor magnetické indukce změřený senzorem MAG3110

Odesílaný paket dat při měření teploty a tlaku je zobrazen v tab. 4.5. Paket obsahuje celkem 8 datových bajtů a 2 bajty označující začátek a konec paketu. Bajty p_1 (nejnižší), p_2, p_3 a p_4 (nejvyšší) tvoří dohromady tlak p reprezentovaný datovým typem float (32 bitů). Bajty T_1 (nejnižší), T_2, T_3 a T_4 (nejvyšší) tvoří dohromady teplotu T reprezentovanou datovým typem float. Tlak je reprezentován číslem v jednotkách Pa, teplota číslem v jednotkách °C.

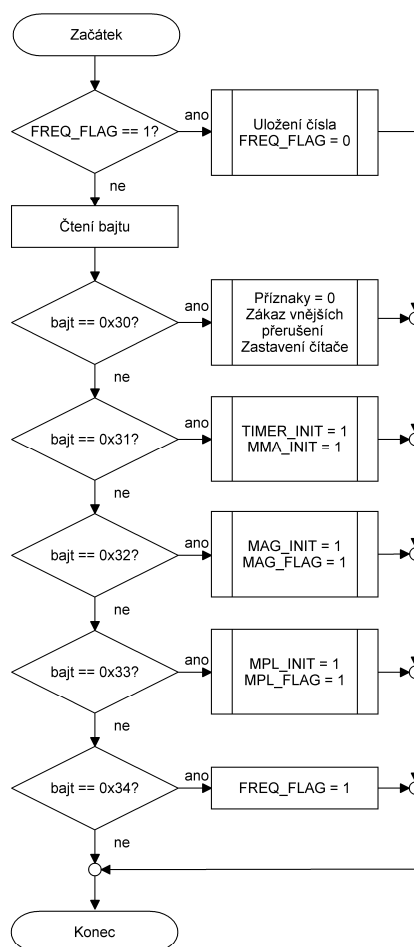
0xFF	p_1	p_2	p_3	p_4	T_1	T_2	T_3	T_4	0xFE
------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	------

Tab. 4.5: Paket dat obsahující teplotu a tlak změřené senzorem MPL3115A2

4.1.3 Popis programu SENZORY mikrokontroléru

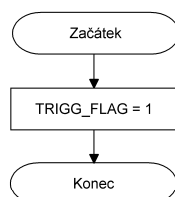
V této kapitole jsou popsány a znázorněny zjednodušené vývojové diagramy jednotlivých částí programu SENZORY. Konkrétně se jedná o vývojové diagramy hlavní smyčky, obslužné rutiny přerušení od čítače, UARTu a brány A. Senzory magnetického pole a teplotní a tlakový senzor měří dle nastavené vzorkovací frekvence v jejich vnitřních registrech a k indikaci jejich nových naměřených vzorků jsou využity jejich přerušovací výstupy připojené na vstupy brány A. Tyto vstupy jsou nastaveny jako vstupy vnějšího přerušení reagujícího na náběžnou hranu signálu (PTA16 pro senzor magnetického pole) a doběžnou hranu signálu (PTA15 pro teplotní a tlakový senzor). Měření pomocí akcelerometru je spouštěno periodicky pomocí čítače.

Na obrázku 4.4 je vývojový diagram obslužné rutiny přerušení od UARTu. V rutině se čte přijatý bajt a podle něj se nastavují příznaky. Příznaky jsou v programu reprezentovány jednobitovou proměnnou typu bool. Po přijetí bajtu 0x34 se nahodí příznak `FREQ_FLAG`, který označuje, že další přijatý bajt obsahuje číslo reprezentující vzorkovací frekvenci senzorů. Přijatý bajt 0x31 způsobí nahození příznaků `MMA_FLAG` a `TIMER_INIT`. `MMA_FLAG` označuje, že má být prováděno měření pomocí akcelerometru. `TIMER_INIT` se používá k inicializaci čítače dle přijaté vzorkovací frekvence. Přijatý bajt 0x32 slouží k nahození příznaků `MAG_FLAG` a `MAG_INIT`. `MAG_FLAG` označuje, že má být prováděno měření pomocí senzoru magnetického pole. `MAG_INIT` se používá k inicializaci senzoru dle přijaté vzorkovací frekvence a povolení vnějšího přerušení vstupního pinu brány A. Přijatý bajt 0x33 slouží k nahození příznaků `MPL_FLAG` a `MPL_INIT`. `MPL_FLAG` označuje, že má být prováděno měření pomocí tlakového a teplotního senzoru. `MPL_INIT` se slouží k inicializaci senzoru dle přijaté vzorkovací frekvence a povolení vnějšího přerušení vstupního pinu brány A. Přijatý bajt 0x30 zajistí shození všech příznaků, zastavení čítače a zakázání vnějšího přerušení od brány A.



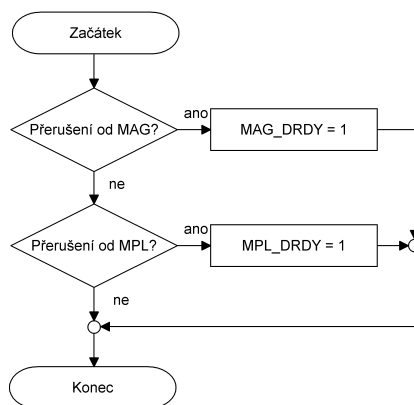
Obr. 4.4: Vývojový diagram obslužné rutiny přerušení od UARTu programu SENZORY

Při měření zrychlení je inicializován čítač, v jehož obslužné rutině se periodicky nahazuje příznak TRIGG_FLAG, který slouží pro spouštění měření pomocí tohoto senzoru v přesných časových intervalech odpovídajících požadované vzorkovací frekvenci. Vývojový diagram obslužné rutiny přerušení od čítače je uveden na obr. 4.5.



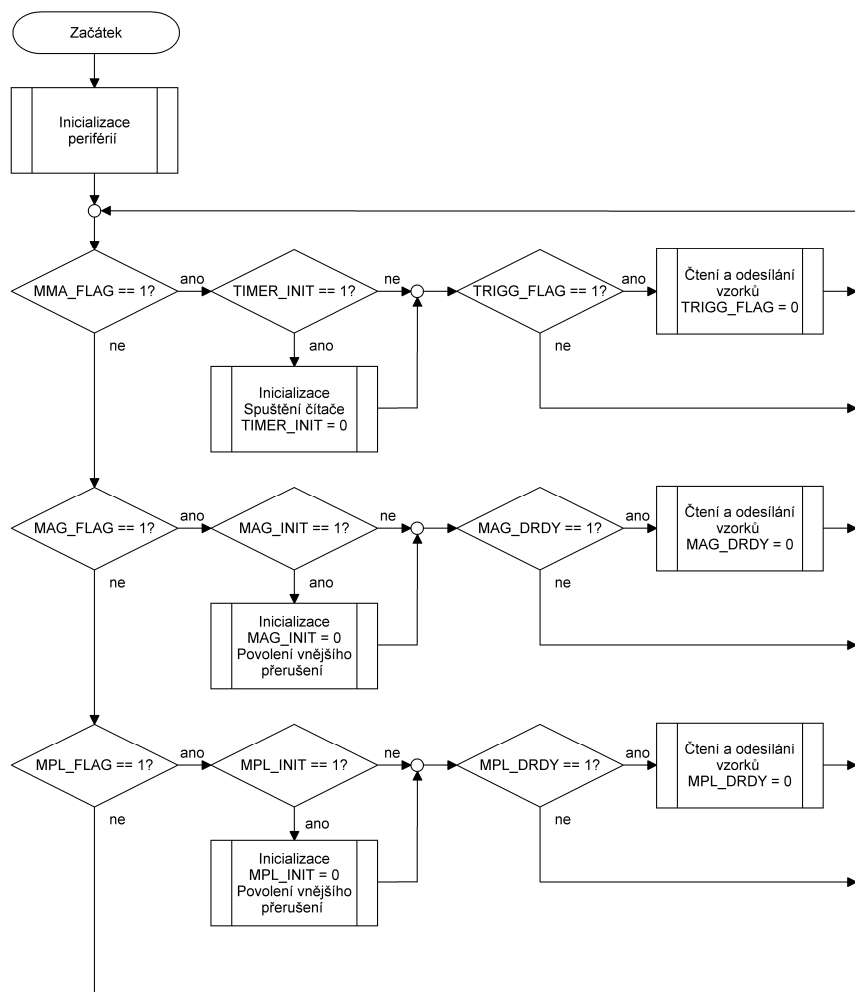
Obr. 4.5: Vývojový diagram obslužné rutiny přerušení od čítače programu SENZORY

Na obrázku 4.6 je zobrazen vývojový diagram obslužné rutiny přerušení od brány A. V této rutině se nahazují příznaky MAG_DRDY, pokud bylo přerušení vyvoláno z pinu připojeného na přerušovací výstup senzoru magnetického pole a MPL_DRDY, pokud bylo přerušení vyvoláno z pinu připojeného na přerušovací výstup senzoru tlakového a teplotního senzoru.



Obr. 4.6: Vývojový diagram obslužné rutiny přerušení od brány A programu SENZORY

Vývojový diagram hlavní smyčky programu je uveden na obr. 4.7. V nekonečné smyčce se testují hodnoty dříve popsaných příznaků a podle nich se provádí měření zvolených fyzikálních veličin pomocí senzorů.



Obr. 4.7: Vývojový diagram hlavní smyčky programu SENZORY

4.2 Aplikace GENERÁTOR

4.2.1 Popis aplikace pro osobní počítač

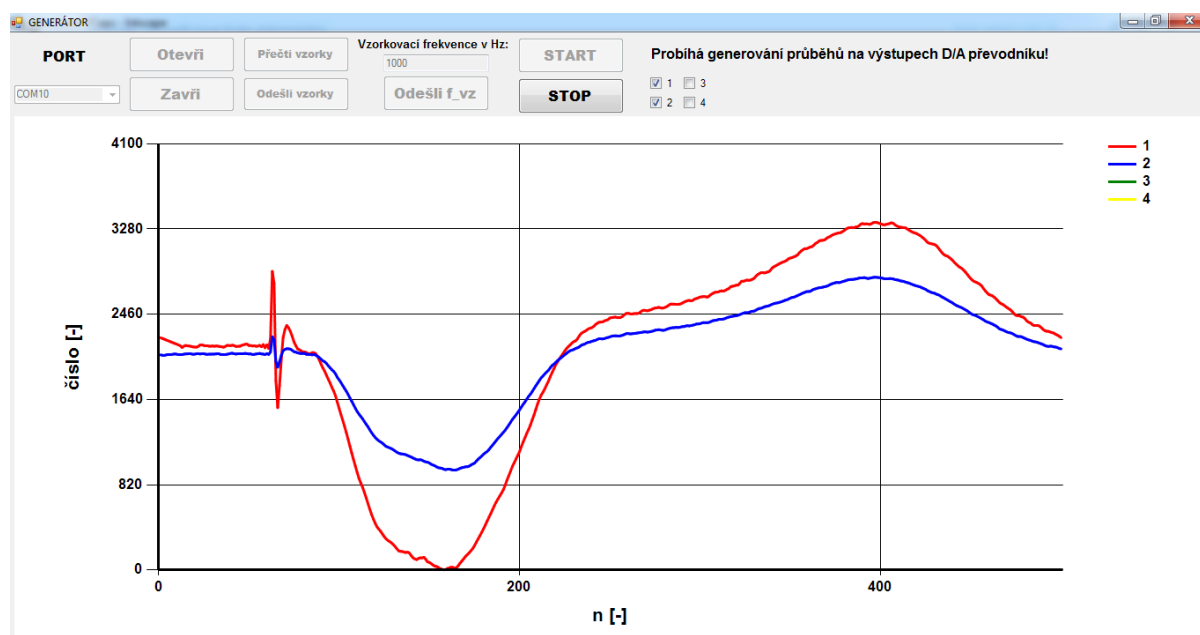
Aplikace obsahuje celkem sedm tlačítek, pole výběru, textové pole, graf, tři popisky a čtyři zaškrtačovací pole. Tlačítka jsou postupně povolována a zakazována kvůli tomu, aby se ošetřily případné chyby a zamezilo se nechtěnému pádu programu. Popisek umístěný vpravo nahoře slouží k informování obsluhy aplikace. Nejprve je nezbytné načíst připravené vzorky z textových souborů `vzorky1.txt`, `vzorky2.txt`, `vzorky3.txt` a `vzorky4.txt`. V každém textovém souboru musí být celkem 500 vzorků oddělených po řádcích. Načtení se provede kliknutím na tlačítko PŘEČTI VZORKY. Poté lze vzorky vykreslit do grafu pomocí zaškrtačvacích tlačítek. Dále je nutné pomocí pole výběru umístěného pod popiskem PORT vybrat komunikační port, ke kterému je připojeno zařízení. Kliknutím na tlačítko OTEVŘI dojde k otevření portu. Tlačítko ZAVŘI slouží k uzavření portu. Po otevření portu je zapotřebí odeslat vzorky do mikrokontroléru kliknutím na tlačítko ODEŠLI VZORKY. Dále se nastavuje vzorkovací frekvence prostřednictvím textové pole a po kliknutí na tlačítko ODEŠLI F_VZ se číslo odešle do mikrokontroléru. Vzorkovací frekvence je omezena na rozsah od 250 Hz do 2 kHz. Tento rozsah odpovídá při 500 vzorcích na periodu tepové frekvenci od 30 do 240 tepů za minutu. Tlačítko START slouží k zahájení generování průběhů na výstupu D/A převodníku. Stisknutím tlačítka STOP dojde k zastavení generování průběhů na výstupu D/A převodníku. Po stisknutí tohoto tlačítka lze nastavit novou vzorkovací frekvenci, odeslat ji do mikrokontroléru a zahájit generování průběhů pomocí nově nastavené vzorkovací frekvence. Po stisknutí tlačítka ZAVŘI dojde k uzavření portu a lze načíst nové vzorky z textových souborů a pokračovat výše popsáním způsobem bez nutnosti opětovného spuštění aplikace. Grafický snímek obrazovky zachycující aplikaci při ovládání generátoru EKG signálů je uveden na obr. 4.8.

4.2.2 Komunikace mezi mikrokontrolérem a osobním počítačem

Komunikace mezi mikrokontrolérem a osobním počítačem probíhá pomocí sériového rozhraní UART. Komunikace probíhá po jednotlivých bajtech modulační rychlostí 115200 Bd. Mikrokontrolér přijímá jednotlivé bajty dat nebo pakety složené z jednotlivých bajtů dat.

4.2.2.1 Přijímaná data mikrokontrolérem

Nejprve je nutné odeslat do mikrokontroléru 12bitové vzorky, které budou generovány na výstupech D/A převodníku. V případě použití všech čtyř kanálů D/A převodníku, počtem vzorků 500 na jednu periodu a reprezentací jednotlivých vzorků pomocí dvou bajtů dat se jedná celkem o 4000 bajtů. Před odesláním vzorků se odešle bajt obsahující hexadecimální kód 0x32. Tento bajt slouží k signalizaci, že dalších 4000 bajtů dat bude obsahovat vzorky.



Obr. 4.8: Grafický snímek obrazovky zachycující aplikaci GENERÁTOR

0x32	vzorek č. 1 (vyšší bajt)	vzorek č. 1 (nižší bajt)	...	vzorek č. 2000 (nižší bajt)
------	--------------------------	--------------------------	-----	-----------------------------

Tab. 4.6: Paket dat obsahující vzorky pro D/A převodník

V dalším kroku je potřeba nastavit vzorkovací frekvenci D/A převodníku. Nastavení se provede odesláním paketu dat složeného ze tří bajtů. První bajt obsahuje hexadecimální kód 0x33 a slouží pouze k identifikaci, že další dva bajty budou obsahovat vzorkovací frekvenci. Vzorkovací frekvence je reprezentována číslem složeným ze 2 bajtů dat a je odesílána vyšším bajtem napřed.

0x33	číslo (vyšší bajt)	číslo (nižší bajt)
------	--------------------	--------------------

Tab. 4.7: Paket dat pro nastavení vzorkovací frekvence D/A převodníku

Pro spuštění a zastavení generování průběhů na výstupech D/A převodníku je nutné odeslat do mikrokontroléru bajtu s hexadecimálními kódy dle tab. 4.8.

4.2.3 Popis programu GENERÁTOR mikrokontroléru

V této kapitole jsou popsány a znázorněny zjednodušené vývojové diagramy jednotlivých částí programu GENERÁTOR. Konkrétně se jedná o vývojové diagramy hlavní smyčky a obslužné rutiny přerušení od čítače a UARTu. Vzorky jsou posílány do převodníků pomocí čítače, který je nastaven dle požadované vzorkovací frekvence.

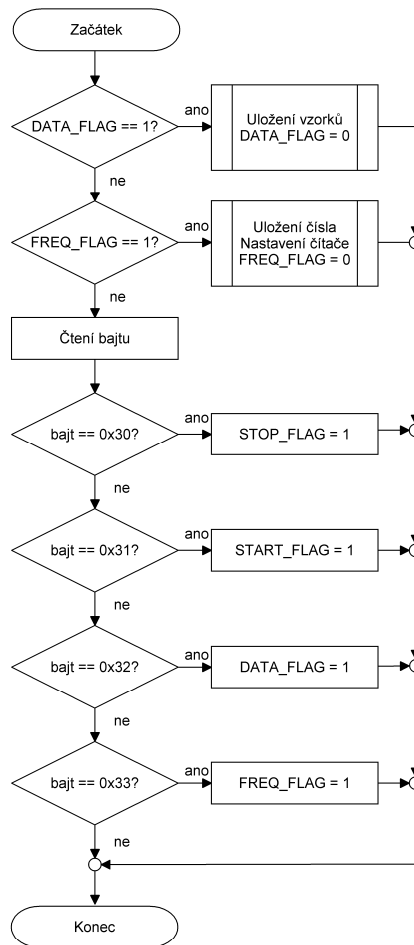
V přerušení od UARTu se nastavují jednotlivé příznaky dle příchozího bajtu. Po přijetí bajtu 0x32 se nahodí příznak DATA_FLAG, který označuje, že další přijaté bajty obsahují vzorky. Po nahození tohoto příznaku je přijímáno celkem 4000 bajtů dat. Přijatý bajt 0x33

Akce	Hexadecimální kód
Zastavení generování průběhů	30
Spuštění generování průběhů	31

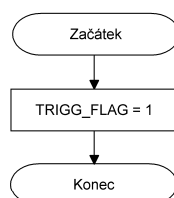
Tab. 4.8: Přijímané bajty mikrokontrolérem v aplikaci GENERÁTOR

způsobí nastavení příznaku `FREQ_FLAG`, který označuje, že následující dva přijaté bajty obsahují vzorkovací frekvenci. Dle vzorkovací frekvence se poté nastaví čítač. Po přijetí bajtu `0x30` se nastaví `STOP_FLAG`, po přijetí `0x31` se nastaví `START_FLAG`. Vývojový diagram obslužné rutiny přerušeni od UARTu je uveden na obr. 4.9.

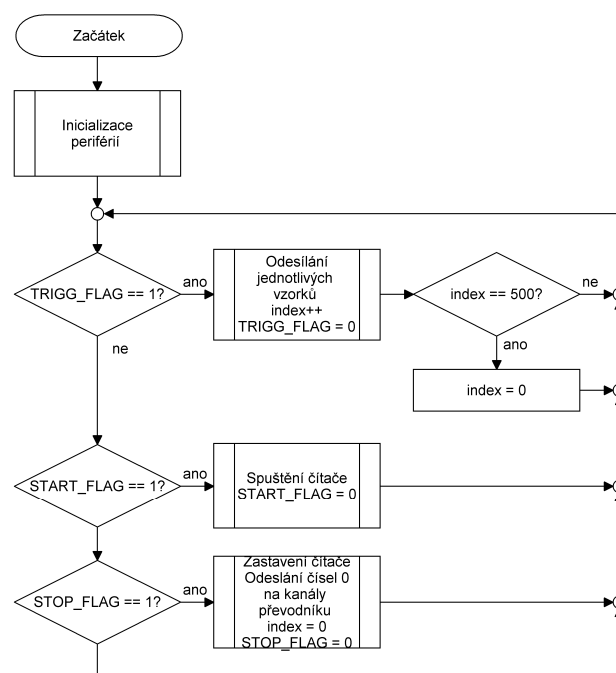
Příznak `START_FLAG` spustí čítač. V obslužné rutině přerušeni od přetečení tohoto čítače je nastavován příznak `TRIGG_FLAG` s periodou odpovídající požadované vzorkovací frekvenci. Tento příznak je dále testován v hlavní smyčce programu a je-li nastaven, dojde k odeslání vzorků uložených na pozici určené indexem do převodníku a příznak se shodí. Po odeslání všech vzorků (celé periody) je index nastaven na začátek. Příznak `STOP_FLAG` slouží k zastavení čítače. Na všechny kanály se odešlou nuly a vynuluje se proměnná index, což zajistí, že po opětovném spuštění generování budou průběhy začínat jejich prvními vzorky.



Obr. 4.9: Vývojový diagram obslužné rutiny přerušení od UARTu programu GENERÁTOR



Obr. 4.10: Vývojový diagram obslužné rutiny přerušení od čítače programu GENERÁTOR



Obr. 4.11: Vývojový diagram hlavní smyčky programu GENERÁTOR

5

Ověření funkce systému

Při ověřování správné funkce systému byla zvláště testována jeho sensorická část a část obsahující generátor EKG signálů.

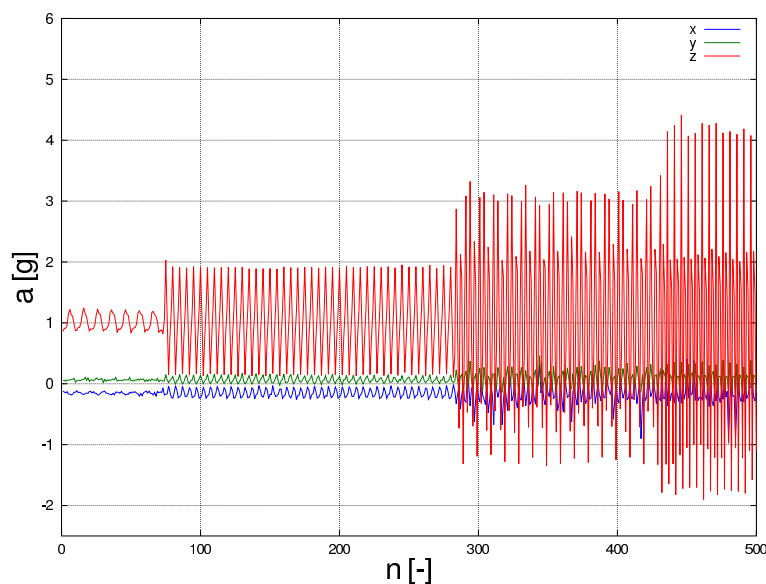
5.1 Ověření funkce sensorické části systému

K ověření správné funkce systému při měření zrychlení a magnetické indukce byl použit elektrodynamický vibrátor ET-132-2. Deska se senzory byla přichycena na plošinu připevněnou na tomto vibrátoru. K vibrátoru byl dále připojen generátor se zesilovačem. Generátor umožňoval sinusovým, obdélníkovým nebo trojúhelníkovým signálem ovládat kmitání plošiny. Pod plošinou byl dále připevněn optický reflexní senzor určený pro měření vzdálenosti. Senzor na svém výstupu generoval napěťový signál úměrný vzdálenosti mezi měřicí částí tohoto senzoru a plošinou. Tento signál byl zobrazován na osciloskopu a sloužil k ověření, zda kmity plošiny odpovídaly budícímu signálu z generátoru o zvolené frekvenci. Měření bylo ovládáno pomocí aplikace Senzory pro osobní počítač.

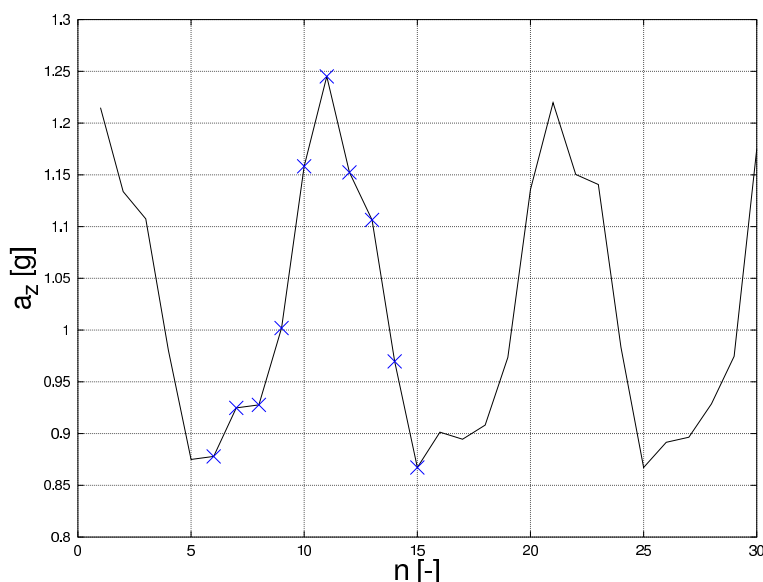
Při měření zrychlení byla nastavena vzorkovací frekvence použitého akcelerometru na 100 Hz. Plošina byla rozkmitávána postupně pomocí sinusového signálu o frekvenci 10, 20, 30 a 40 Hz. Zrychlení bylo měřeno ve směrech všech tří os. Největších hodnot dosahovalo zrychlení ve směru osy z, což bylo dáno polohou akcelerometru na desce připevněné k plošině. Naměřené vzorky zrychlení ve směrech všech os jsou znázorněny na obr. 5.1. Z tohoto grafu je patrné, že čím větší je frekvence kmitání plošiny, tím vyšších hodnot dosahuje měřené zrychlení, jak bylo očekáváno. Nejvyšší hodnota výsledného vektoru zrychlení dosahovala hodnoty 4,52 g.

Na obr. 5.2 jsou vyznačeny naměřené vzorky zrychlení ve směru osy z během jedné periody při rozkmitání plošiny sinusovým signálem o frekvenci 10 Hz. Této frekvenci spolu s vzorkovací frekvencí 100 Hz použitého akcelerometru odpovídá celkem 10 naměřených vzorků za jednu periodu.

Při měření magnetické indukce byl kousek od plošiny umístěn permanentní magnet. Vzorkovací frekvence použitého senzoru magnetického pole byla nastavena na 80 Hz. Plošina byla rozkmitávána postupně pomocí obdélníkového, trojúhelníkového a sinusového



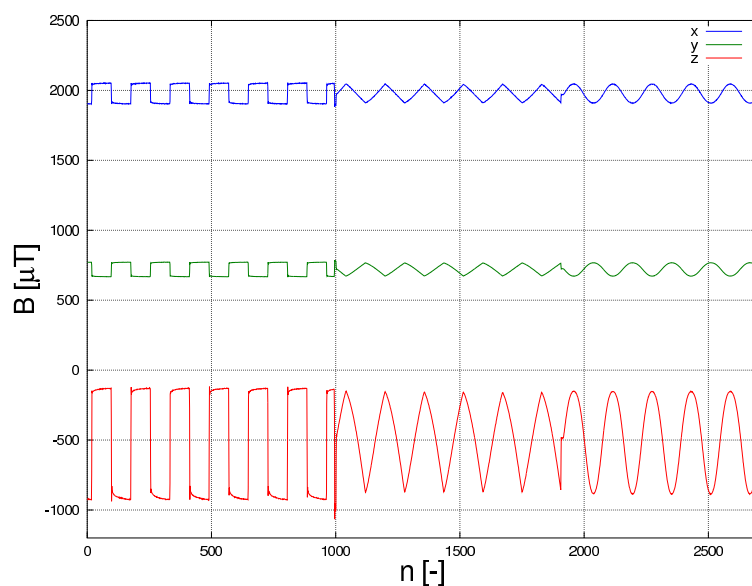
Obr. 5.1: Naměřená zrychlení ve směru všech tří os při postupném rozkmitávání plošiny sinusovým signálem o frekvenci 10, 20, 30 a 40 Hz



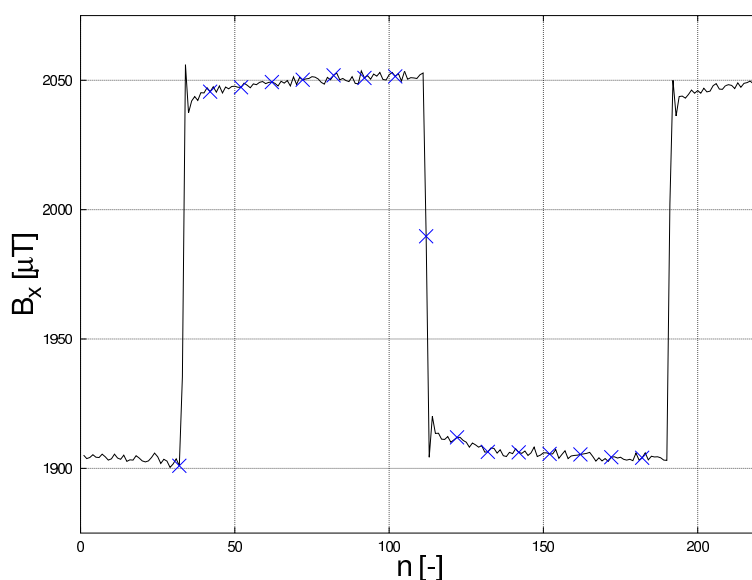
Obr. 5.2: Naměřené zrychlení ve směru osy z s vyznačenými vzorky během jedné periody při rozkmitání plošiny sinusovým signálem o frekvenci 10 Hz

signálu. Ve všech třech případech byla frekvence budícího signálu 0,5 Hz. Naměřené vzorky magnetické indukce ve směrech všech os jsou uvedeny na obr. 5.3.

Na obr. 5.4 je zobrazena perioda naměřených vzorků magnetické indukce ve směru osy x při rozkmitání plošiny obdélníkovým signálem o frekvenci 0,5 Hz. Této frekvenci spolu s vzorkovací frekvencí použitého senzoru magnetického pole odpovídá celkem 160 naměřených vzorků za jednu periodu. Křížky v obrázku reprezentují naměřené vzorky. Z důvodu přehlednosti jeden křížek odpovídá deseti naměřeným vzorkům.



Obr. 5.3: Naměřené magnetické indukce ve směru všech tří os při postupném rozkmitávání plošiny obdélníkovým, trojúhelníkovým a sinusovým signálem o frekvenci 0,5 Hz

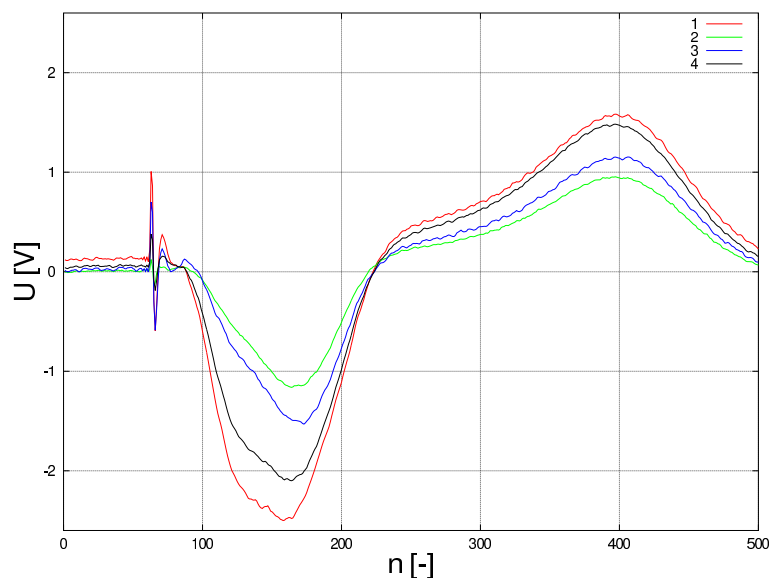


Obr. 5.4: Naměřená magnetická indukce ve směru osy x s vyznačenými vzorky během jedné periody při rozkmitání plošiny obdélníkovým signálem o frekvenci 0,5 Hz

5.2 Ověření funkce generátoru EKG

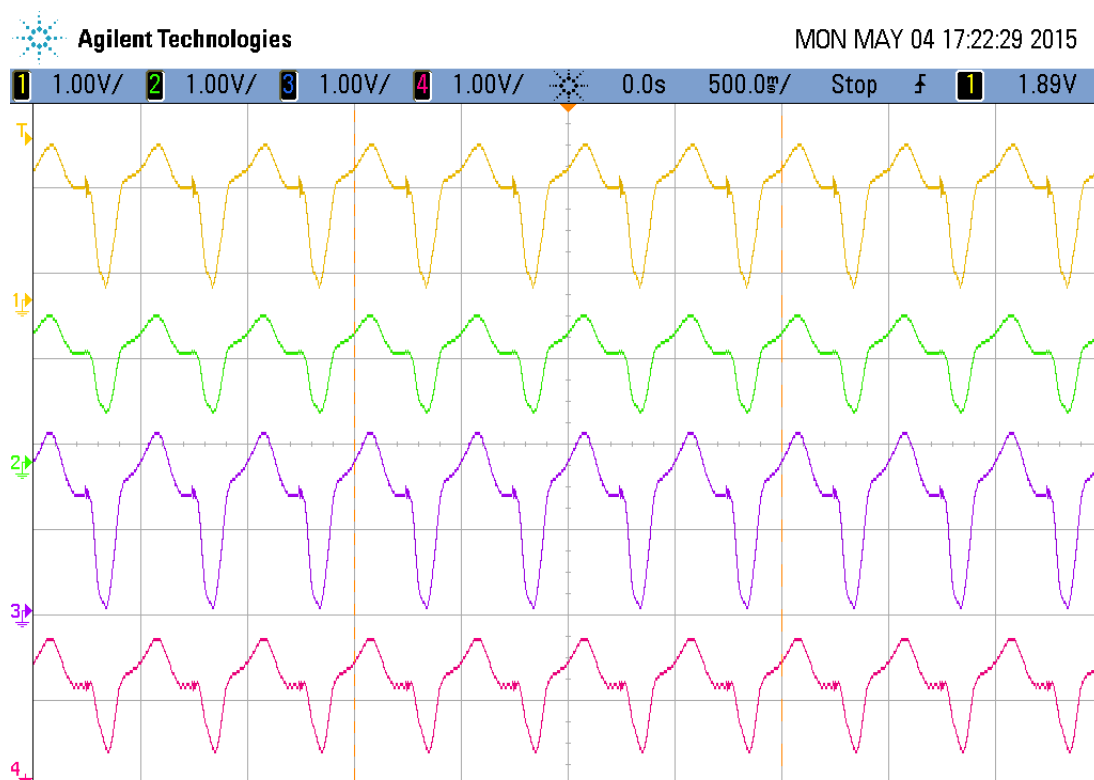
K ověření správné funkce generátoru EKG byly použity průběhy pořízené kardiostimulátorem při snímání z dvanácti svodů. Z dvanácti získaných průběhů byly vybrány čtyři, u nichž byly nejzřetelnější charakteristické rysy EKG signálu. V každém průběhu byla zaznamenána jedna perioda elektrické aktivity srdečního svalu o celkovém počtu 400 vzorků. Počet vzorků byl upraven kvůli požadavkům aplikace na 500 tak, že vzorky byly nejprve 5krát interpolovány a posléze 4krát decimovány. Vzorky byly dále upraveny tak, aby byl plně využit rozkmit D/A převodníku. Největší hodnota napětí všech vzorků v absolutní

hodnotě byla přiřazena referenčnímu napětí 2,5 V, zbylé hodnoty byly podle této hodnoty přepočítány. Tím se u všech průběhů docílilo stejného měřítka. Generování průběhů na výstupu D/A převodníku bylo ovládáno pomocí aplikace GENERÁTOR pro osobní počítač. Vzorkovací frekvence byla nastavena na 1 kHz. Při počtu 500 vzorků na periodu to odpovídalo tepové frekvenci 2 Hz neboli 120 tepů za minutu. Upravené vzorky jsou zobrazeny na obr. 5.5.

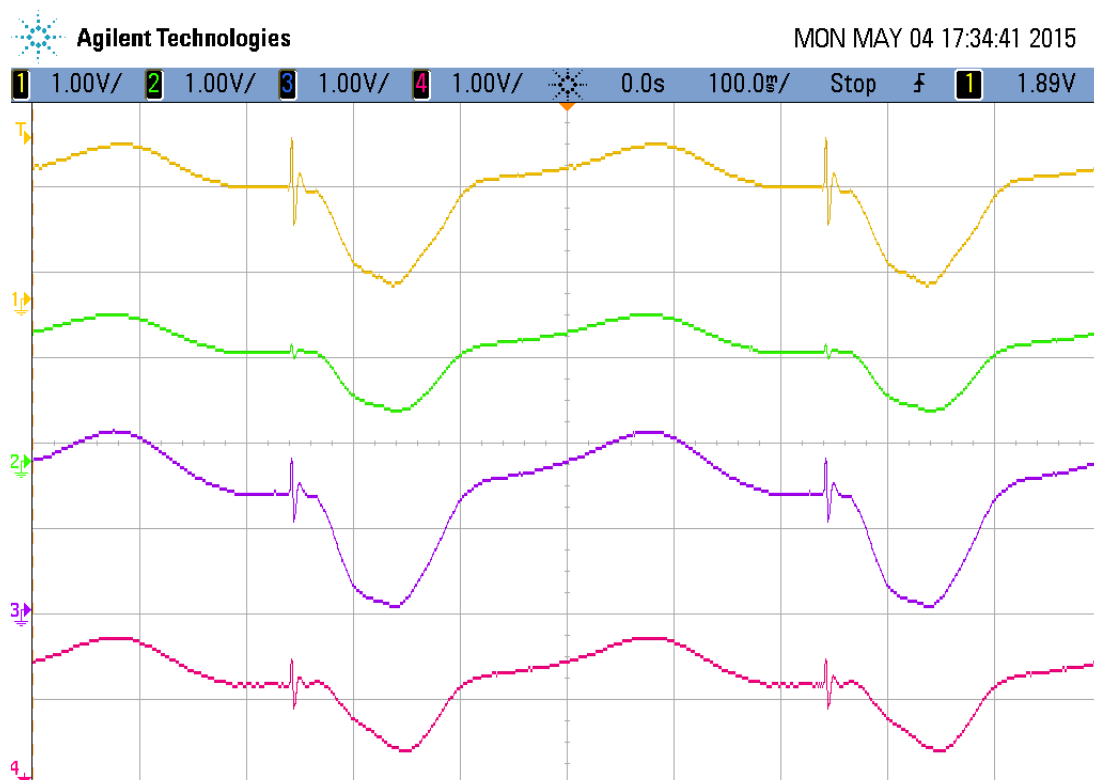


Obr. 5.5: Upravené vzorky průběhů EKG signálů

Průběhy EKG signálů generované pomocí unipolárních výstupů D/A převodníku zaznamenané osciloskopem jsou zobrazeny na obr. 5.6, v bližší přiblížení pak na obr. 5.7.



Obr. 5.6: Průběhy EKG signálů zaznamenané osciloskopem



Obr. 5.7: Přiblížené průběhy EKG signálů zaznamenané osciloskopem

6

Závěr

Cílem práce bylo navrhnout a zkonstruovat senzorický systém pro lékařské aplikace. Systém nalezne uplatnění především v oblasti spiroergometrie a elektrokardiografie. Pomocí generátoru EKG bude možné testovat přístroje používané pro měření EKG signálů jako je elektrokardiogram či holter.

Systém obsahuje senzorickou část a generátor EKG signálů. Dohromady ho tvoří více desek plošných spojů. Sensory jsou umístěny na samostatných destičkách navržených s důrazem na minimální rozměry. Na každé destičce jsou akcelerometr MMA8491Q, senzor magnetického pole MMA3110 a tlakový a teplotní senzor MPL3115A2. Generátor EKG signálů je umístěn na hlavní desce s mikrokontrolérem. Kvůli možnému budoucímu využití jsou všechny nevyužité vývody mikrokontroléru vyvedeny na kolíkové lišty.

Systém umožňuje měření zrychlení v rozsahu od -8 g do 8 g, magnetické indukce v rozsahu od -1 mT do 1 mT, tlaku v rozsahu od 50 kPa do 110 kPa a teploty v rozsahu od -40 °C do 85 °C. Měření je ovládané z aplikace pro osobní počítač. V této aplikaci jsou naměřená data ze senzorů vizualizována prostřednictvím dynamicky se měnícího grafu. Dále jsou data aplikací ukládána do textových souborů. Aplikace umožňuje nastavovat vzorkovací frekvenci senzorů z konfiguračních textových souborů. Z těchto souborů jsou rovněž nastavovány parametry grafu.

Generátor EKG signálů byl realizován pomocí jednoho čtyřkanálového D/A převodníku s rozlišením 12 bitů. Deska plošného spoje však byla navržena pro 3 takové převodníky z důvodu možnosti simulace 12 svodů EKG. Počet generovaných vzorků byl omezen na 500 z důvodu ukládání těchto vzorků do datové paměti mikrokontroléru. Generátor je ovládán pomocí aplikace pro osobní počítač. Aplikace umožňuje uživateli spouštět a zastavovat generování průběhů. Aplikace dále umožňuje nastavit frekvenci, s níž jsou postupně posílány vzorky do D/A převodníku. Tato frekvence byla omezena na rozsah od 250 Hz do 2 kHz, který při počtu vzorků 500 odpovídá tepové frekvenci v rozmezí od 30 do 240 tepů za minutu.

Správná funkce senzorické části systému byla ověřena měřením vektorů zrychlení a magnetické indukce. Destičky se senzory byla při tomto měření umístěna na elektrodynamickém vibrátoru. Ověření správné funkce generátoru EKG bylo provedeno generováním

čtyř reálné signálů získaných kardiostimulátorem z 12-ti svodového EKG a zobrazováním těchto signálů na osciloskopu.

Deska se senzory byla kompletně osazena součástkami. Deska s mikrokontrolérem a D/A převodníky z důvodů problémů s dodáním objednaných součástek kompletně osazena nebyla, konkrétně chyběla napěťová reference pro převodníky, obvody pro úpravu napájení a převodník UART/USB. Při testování obvodu bylo tedy nutné použít externí zdroje napětí. Komunikace s osobním počítačem byla realizována pomocí vývojového kitu FRDM-KL25Z.

Systém by bylo možné dále vylepšit připojením externí paměti pro uložení většího počtu vzorků, než je tomu v případě použití datové paměti mikrokontroléru. Dále by bylo vhodné systém doplnit o další speciální senzory používané v lékařství, např. senzor pro měření krevního tlaku.

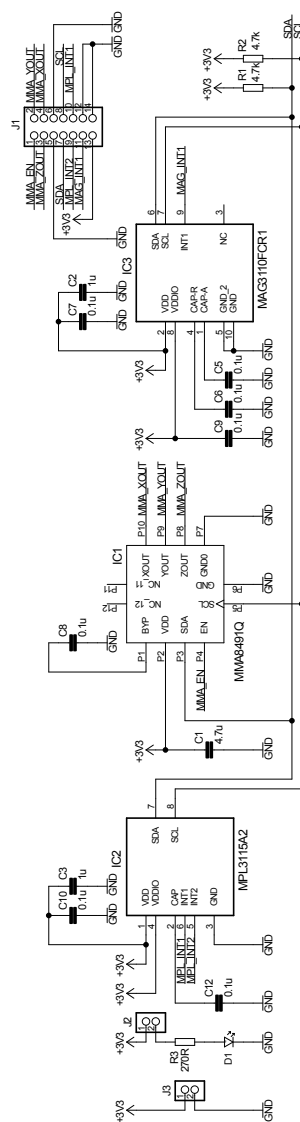
Literatura

- [1] Pinker, J. *Mikroprocesory a mikropočítače*. Praha: BEN - technická literatura, 2008. ISBN 978-80-7300-110-0.
- [2] Matoušek, D. *Aplikace mikrokontrolérů ATmega644*. Praha: BEN - technická literatura, 2013. ISBN 978-80-7300-492-7.
- [3] Freescale Semiconductor. *Xtrinsic MMA8491Q 3-Axis Multi-function Digital Accelerometer* [online]. 2012. Poslední aktualizace č. 2.0, listopad 2012. [Cit. 23. 4. 2015]. Dostupné z: http://cache.freescale.com/files/sensors/doc/data_sheet/MMA8491Q.pdf?pspll=1
- [4] Freescale Semiconductor. *Xtrinsic MPL3115A2 I²C Precision Altimeter* [online]. 2013. Poslední aktualizace č. 3.0, prosinec 2013. [Cit. 23. 4. 2015]. Dostupné z: http://cache.freescale.com/files/sensors/doc/data_sheet/MPL3115A2.pdf?pspll=1
- [5] Freescale Semiconductor. *Xtrinsic MAG3110 Three-Axis, Digital Magnetometer* [online]. 2013. Poslední aktualizace č. 9.2, únor 2013. [Cit. 23. 4. 2015]. Dostupné z: http://cache.freescale.com/files/sensors/doc/data_sheet/MAG3110.pdf?faspl=1
- [6] Maxim Integrated. *Calibrated, Quad, 12-Bit Voltage-Output DACs with Serial Interface* [online]. 2011. Poslední aktualizace č. 3, březen 2011. [Cit. 8. 5. 2015]. Dostupné z: <http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX536-MAX537.pdf>
- [7] Hitachi. *HD44780U (LCD-II)*[online]. 1998. Poslední aktualizace č. 0.0, srpen 1999. [Cit. 4. 5. 2015]. Dostupné z: <https://www.sparkfun.com/datasheets/LCD/HD44780.pdf>
- [8] Freescale Semiconductor. *KL25 Sub-Family Reference Manual*[online]. 2012. Poslední aktualizace č. 3, září 2012. [Cit. 7. 5. 2015]. Dostupné z: http://cache.freescale.com/files/32bit/doc/ref_manual/KL25P80M48SF0RM.pdf

Příloha A

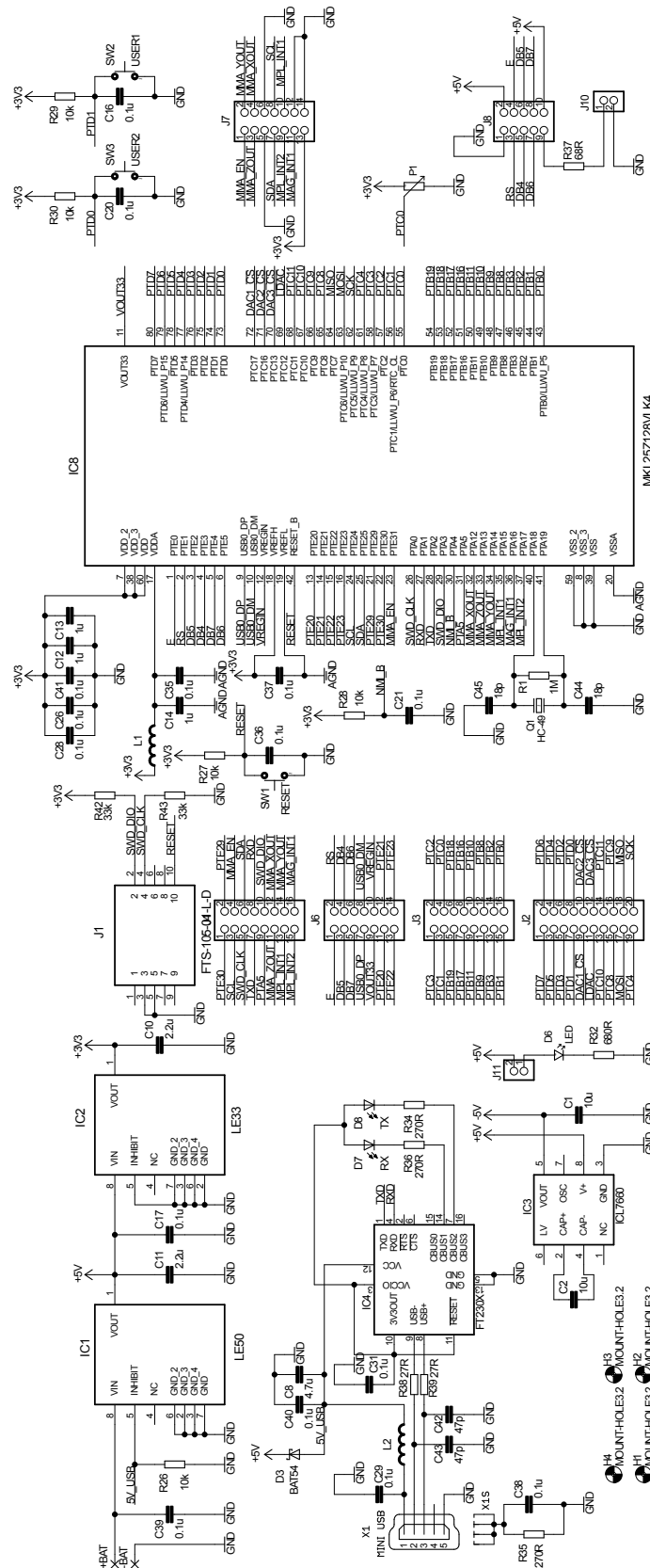
Schémata zapojení

A.1 Deska se senzory

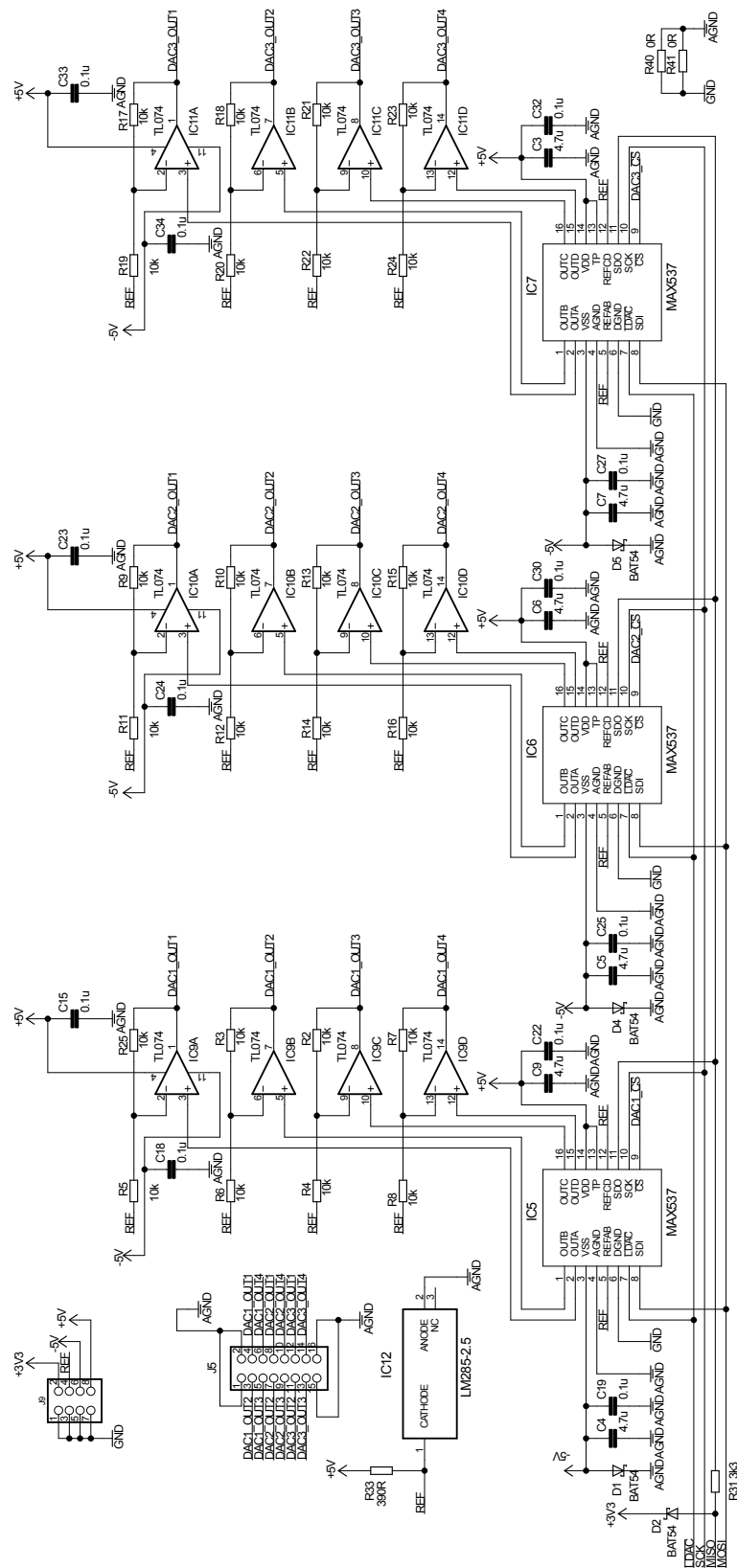


Obr. A.1: Schéma zapojení desky se senzory

A.2 Deska s mikrokontrolérem a D/A převodníky



Obr. A.2: Schéma zapojení desky s mikrokontrolérem a D/A převodníky - část 1

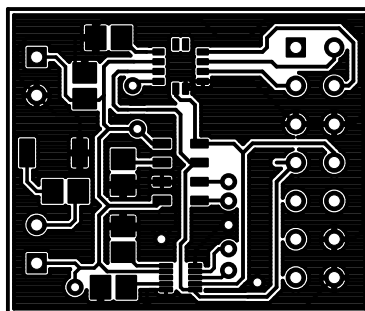


Obr. A.3: Schéma zapojení desky s mikrokontrolérem a D/A převodníky - část 2

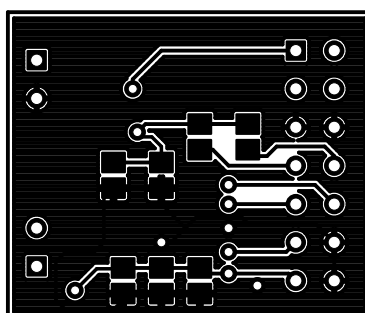
Příloha B

Desky plošných spojů

B.1 Deska se senzory

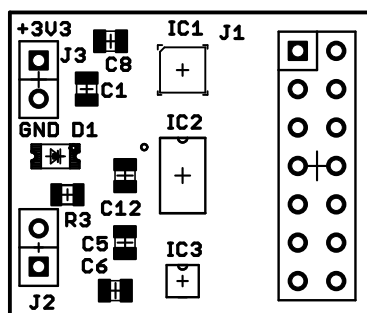


Obr. B.1: Vodivý motiv plošného spoje desky se senzory - horní strana, měřítko 2:1

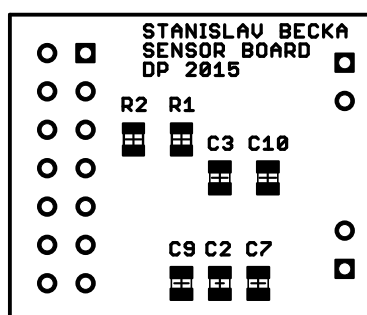


Obr. B.2: Vodivý motiv plošného spoje desky se senzory - spodní strana, měřítko 2:1

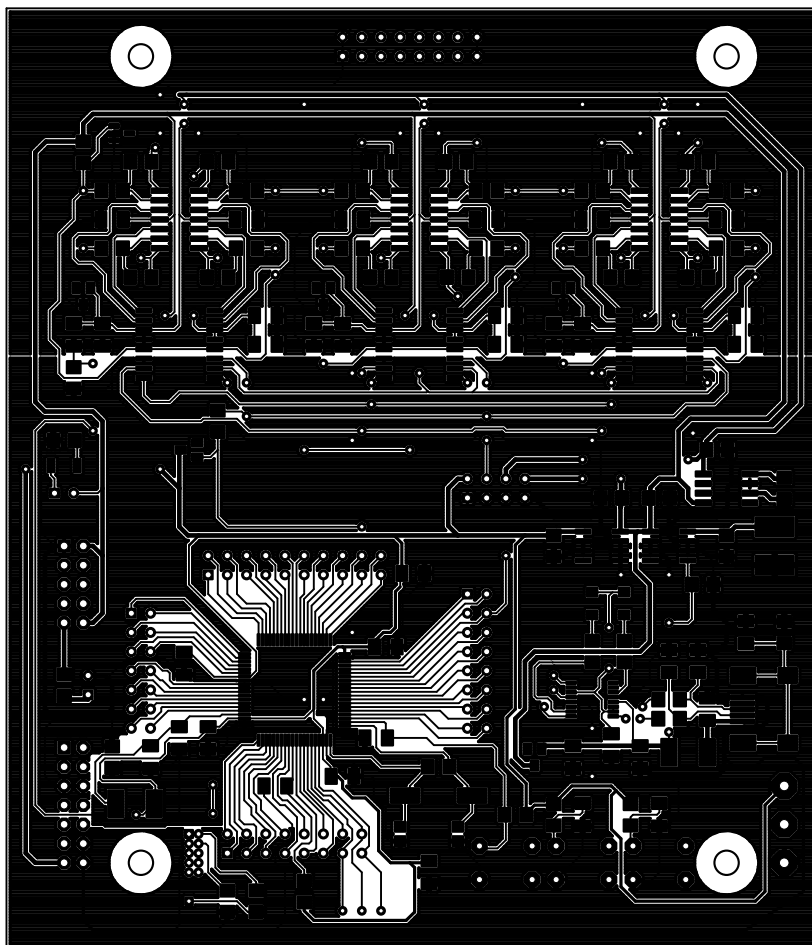
B.2 Deska s mikrokontrolérem a D/A převodníky



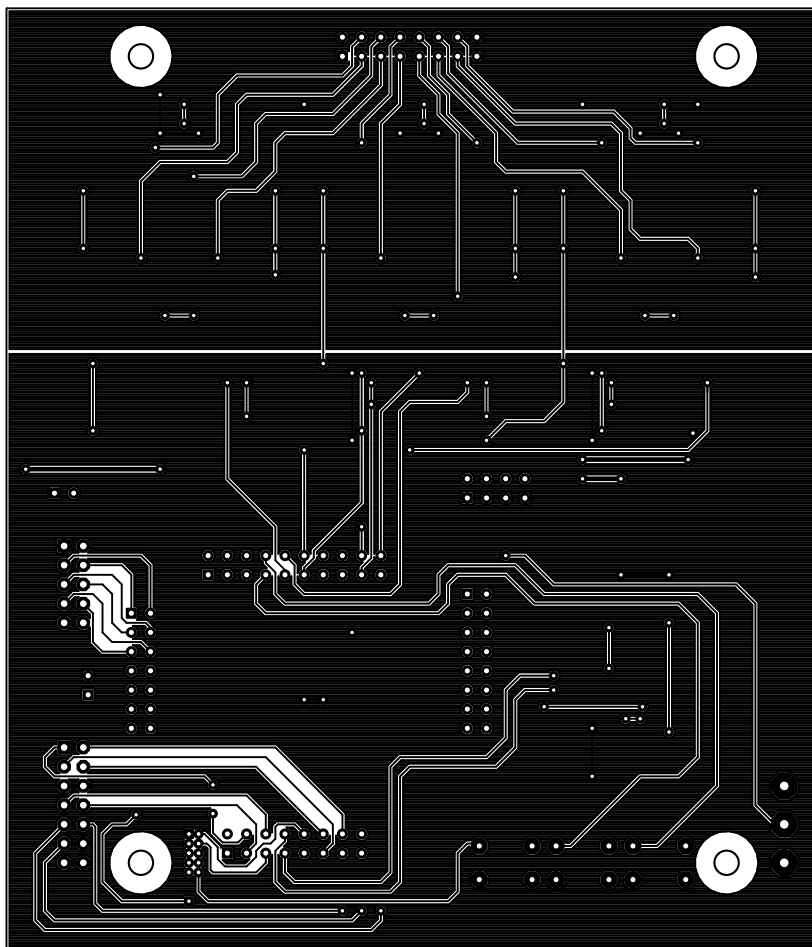
Obr. B.3: Osazovací výkres desky se senzory - horní strana, měřítko 2:1



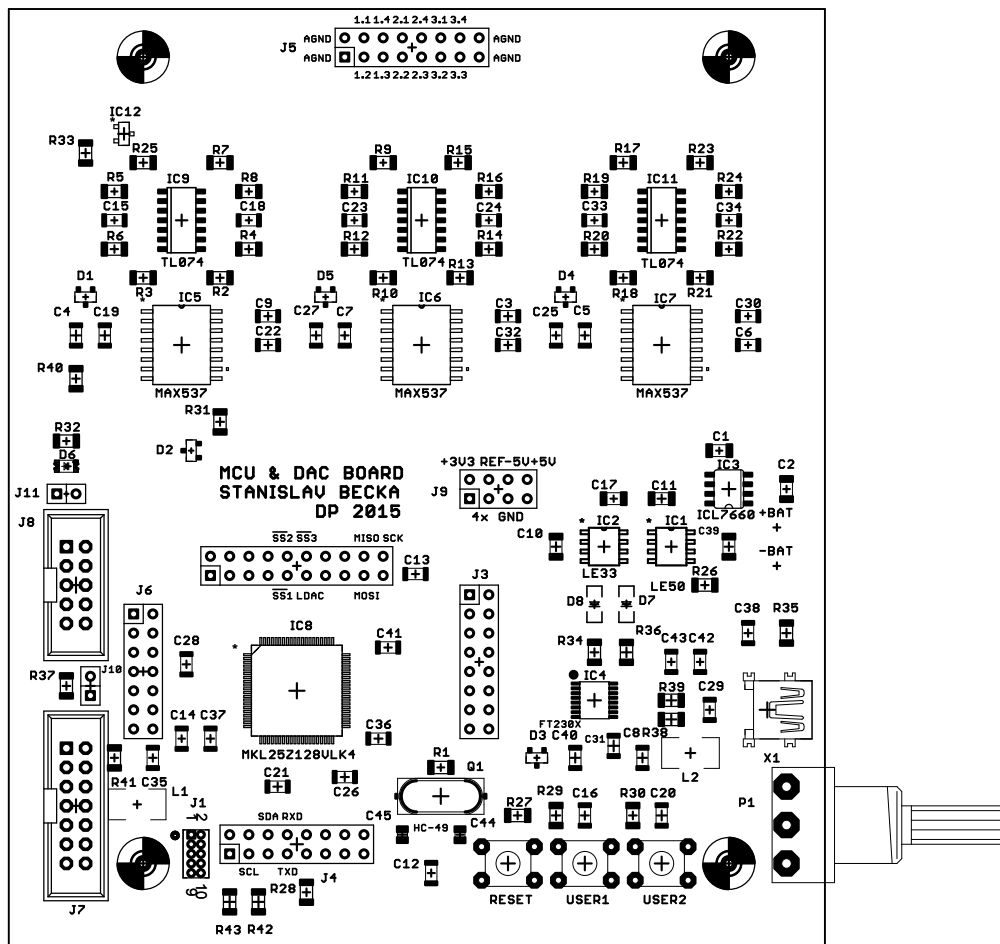
Obr. B.4: Osazovací výkres desky se senzory - spodní strana, měřítko 2:1



Obr. B.5: Vodivý motiv plošného spoje desky s mikrokontrolérem a D/A převodníky - horní strana, měřítko 1:1



Obr. B.6: Vodivý motiv plošného spoje desky s mikrokontrolérem a D/A převodníky - spodní strana, měřítko 1:1



Obr. B.7: Osazovací výkres desky s mikrokontrolérem a D/A převodníky, měřítko 1:1

Příloha C

Seznamy součástek

C.1 Deska se senzory

Součástka	Hodnota	Popis	Pouzdro	Množství
C	4,7 μF	keramický kondenzátor	0805	1
C	1 μF	keramický kondenzátor	0805	2
C	0,1 μF	keramický kondenzátor	0805	7
C	1 μF	keramický kondenzátor	0805	2
D		LED	1206	2
MMA8491Q		akcelerometr	QFN-12	1
MPL3115A2		tlakový a teplotní senzor	LGA-8	1
MAG3110		senzor magnetického pole	QFN-10	1
R	4,7 $\text{k}\Omega$	rezistor	0805	2
R	270 Ω	rezistor	0805	1

Tab. C.1: Seznam součástek desky se senzory

C.2 Deska s mikrokontrolérem a D/A převodníky

Součástka	Hodnota	Popis	Pouzdro	Množství
C	10 μF	keramický kondenzátor	1206	2
C	4,7 μF	keramický kondenzátor	1206	7
C	2,2 μF	keramický kondenzátor	1206	2
C	1 μF	keramický kondenzátor	1206	3
C	0,1 μF	keramický kondenzátor	1206	26
C	47 pF	keramický kondenzátor	1206	2
C	18 pF	keramický kondenzátor	0805	2
D	BAT54	Shottkyho dioda	SOT-23	5
D		LED	1206	3
LE33		Lineární stabilizátor napětí	SO-8	1
LE50		Lineární stabilizátor napětí	SO-8	1
ICL7660		Invertující DC/DC měnič	SO-8	1
FT230X		Převodník UART/USB	SSOP-16	1
TL074		Operační zesilovač	SO-14	3
LM385-2.5		Napěťová reference	SOT-23	1
Q	8 MHz	Krystal	HC-49/US	1
P	10 k Ω	Potenciometr	HC-49/US	1
R	1 M Ω	rezistor	1206	1
R	10 k Ω	rezistor	1206	29
R	3,3 k Ω	rezistor	1206	1
R	680 Ω	rezistor	1206	1
R	390 Ω	rezistor	1206	1
R	270 Ω	rezistor	1206	3
R	68 Ω	rezistor	1206	1
R	27 Ω	rezistor	1206	2
R	0 Ω	rezistor	1206	2
R	33 k Ω	rezistor	1206	2
SW		tlačítko	P-B1720	3
X		konektor	USB- MINI B SMD	1

Tab. C.2: Seznam součástek desky s mikrokontrolérem a D/A převodníky