



**ZÁPADOČESKÁ
UNIVERZITA
V PLZNI**

**Fakulta elektrotechnická
Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Modul pro určení náklonu a orientace v prostoru

**Autor práce: Jan Lodr
Vedoucí práce: Ing. Radek Šalom**

Plzeň 2013

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jan LODR**
Osobní číslo: **E10B0324P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektronika a telekomunikace**
Název tématu: **Modul pro určení náklonu a orientace v prostoru**
Zadávající 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 :

1. Vyhledejte a nastudujte informace o vhodných senzorech pro určování náklonu a orientace v prostoru.
2. Vyberte vhodné technické prostředky pro realizaci modulu.
3. Realizujte praktické řešení modulu pro určení náklonu a orientace v prostoru. Modul bude získávat naměřená data ze senzorů, zpracovávat je a posílat přes komunikační rozhraní za účelem dalšího využití.
4. Zhodnoťte realizované řešení s ohledem na přesnost měření požadovaných veličin a celou práci podrobně popište.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Radek Šalom**
Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací
Konzultant bakalářské práce: **Ing. Radek Šalom**
Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2012**
Termín odevzdání bakalářské práce: **7. června 2013**




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

L.S.


Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

Abstrakt

První část práce je věnována základnímu popisu principu funkce magnetometrů založených na Hallovo jevu a principu proměnné rezistivity materiálu v závislosti na externím magnetickém poli – technologie AMR, GMR a TMR. Dále je popisována funkce piezoelektrických, piezorezistivních a kapacitních akcelerometrů.

Druhá část se zabývá samotným návrhem zařízení pro snímání magnetického pole Země a náklonu pomocí akcelerometru a magnetometru. Naměřená data jsou zpracovávána mikrokontrolérem a zobrazována na LCD displej.

Klíčová slova

akcelerometr, magnetometr, snímání magnetického pole Země a náklonu

Abstract

The first part of the thesis discusses the basic description of the magnetometers' function principle based on Hall's effect and variable resistivity of material principle in the relation to external magnetic field - AMR, GMR and TMR technologies. Furthermore there is described the function of piezoelectric, piezoresistive and capacitive accelerometers.

The second part discusses the design of the device for sensing the magnetic field of Earth and tilt via accelerometers and magnetometer. The measured datas are processed by the microcontroller and displayed on the LCD screen.

Key words

akcelerometr, magnetometr, sensing the magnetic field of Earth and tilt

Prohlášení

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

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce, s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů uvedených v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské 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.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

V Plzni dne 4.6.2013

Jan Lodr

.....

Podpis

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu práce Ing. Radku Šalomovi za cenné rady a připomínky při návrhu a realizaci modulu pro určování náklonu a orientace v prostoru.

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	VI
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	VII
1 ÚVOD.....	1
2 SNÍMAČE POLOHY	3
2.1 MAGNETOMETRY.....	3
2.1.1 Magnetické senzory s Hallovým jevem.....	3
2.1.2 Magnetorezistory	4
2.2 AKCELEROMETRY.....	7
2.2.1 Piezoelektrické akcelerometry	9
2.2.2 Piezorezistivní akcelerometry	10
2.2.3 Kapacitní akcelerometry.....	10
3 POPIS ZAŘÍZENÍ POSITION SENSING BOARD.....	12
3.1 POPIS OVLÁDÁNÍ ZAŘÍZENÍ	13
3.2 POPIS HARDWARU.....	13
3.2.1 Magnetometr MAG3110FCR1	13
3.2.2 Akcelerometr LIS331HH.....	16
3.2.3 Mikrokontrolér MSP430F5510IPT.....	19
3.2.4 Obvod FT230X.....	21
3.2.5 LCD displej.....	22
3.3 POPIS PROGRAMU	23
3.3.1 Seznam a popis funkcí.....	24
3.3.2 Komunikace se senzory.....	26
3.3.3 Komunikace s LCD displejem	27
3.3.4 Režim akcelerometru/magnetometru.....	28
4 ZÁVĚR	31
LITERATURA.....	32
PŘÍLOHY.....	33
PŘÍLOHA A FOTOGRAFIE ZAŘÍZENÍ.....	33
PŘÍLOHA B DESKA PLOŠNÉHO SPOJE, SCHÉMA, SEZNAM SOUČÁSTEK.....	34

Seznam obrázků

Obr. 2.1: Princip vzniku Hallova napětí	3
Obr. 2.2: Princip AMR jevu.....	5
Obr. 2.3: Princip GMR jevu.....	6
Obr. 2.4: Obecný model absolutního senzoru.....	8
Obr. 2.5: Princip piezoelektrického akcelerometru	9
Obr. 2.6: Princip piezorezistivního akcelerometru [převzato z [2]]	10
Obr. 2.7: Princip MEMS akcelerometru	11
Obr. 3.1: Blokové schéma zařízení Position Sensing Board	12
Obr. 3.2: Signalizační a ovládací prvky zařízení	13
Obr. 3.3: Blokové schéma magnetometru MAG3110 [Převzato z [6]]	14
Obr. 3.4: Schéma zapojení magnetometru	15
Obr. 3.5: Orientace os magnetometru – horní pohled [Převzato z [6]].....	15
Obr. 3.6: Blokové schéma akcelerometru LIS331HH [Převzato z [5]].....	16
Obr. 3.7: Schéma zapojení akcelerometru	17
Obr. 3.8: Orientace akcelerometru – horní pohled [Převzato z [5]]	17
Obr. 3.9: Schéma zapojení mikrokontroléru.....	19
Obr. 3.10: Schéma zapojení LED diod a tlačítek	20
Obr. 3.11: Schéma zapojení JTAG rozhraní.....	20
Obr. 3.12: Schéma zapojení obvodu FT230XS	22
Obr. 3.13: Schéma zapojení LCD displeje	22
Obr. 3.14: Vývojový diagram programu	23
Obr. 3.15: Časový diagram zápisu do zařízení typu slave.....	26
Obr. 3.16: Časový diagram čtení jednoho bytu ze zařízení typu slave.....	27
Obr. 3.17: Vývojový diagram výběru režimu.....	28
Obr. 3.18: Adresace RAM paměti řadiče LCD displeje [Převzato z [8]].....	29
Obr. A.1: Horní pohled bez LCD displeje	33
Obr. A.2: Horní pohled	33
Obr. A.3: Spodní pohled	33
Obr. B.1: Horní vrstva. Rozměry: 67,5 x 45,2 mm	34
Obr. B.2: Spodní vrstva	34
Obr. B.3: Schéma zapojení	35

Seznam symbolů a zkratek

AMR	Anisotropic Magnetoresistive
A/D	Analog/Digital
b	Viskózní tlumení
B	Indukce magnetického pole [T]
CMOS	Complementary metal-oxide-semiconductor
CS	Chip Select
D/C	Data/Command
DCO	Digitally controlled Oscillator
DFN	Dual-Flat No-leads
DMA	Direct memory access
E	Intenzita elektrického pole [V/m]
F_M	Magnetická síla [N]
GMR	Giant Magnetoresistive
I	Elektrický proud [A]
IC	Interface Control
I/O	Input/Output
I ² C	Inter-Integrated Circuit
JTAG	Joint Test Action Group
k	Tlumení pružiny
LCD	Liquid-crystal display
LED	Light-Emitting diode
LQFP	Low-profile Quad Flat Package
LSB	Least Significant Bit
m	Seismická hmotnost [kg]
MEMS	Micro-Electro-Mechanical System
MSB	Most Significant Bit
ODR	Output Data Rate
OSR	Over Sampling Ratio
PCB	Printed Circuit Board
PHY	Physical Layer

RAM	Random-Access Memory
R_H	Hallova konstanta [m^3/C]
Rx	Receive
SCK	Serial Clock
SCL	Synchronous Clock
SDA	Synchronous Data
SDI	Serial Data input
SDO	Serial Data output
SPI	Serial Peripheral Interface
TMR	Tunnel Magnetoresistive
Tx	Transmit
UART	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter
U_H	Hallovo napětí [V]
USB	Universal Serial Bus
USCI	Universal Serial Communication Interface
VCORE	Core Voltage

1 Úvod

Magnetické pole je všude kolem nás, nelze ho vidět, ani běžně zaznamenat jinými lidskými smysly, nepočítáme-li polární záři, která vzniká díky magnetickému poli Země. Magnetické pole Země, nazývané geomagnetické pole, je nedílnou součástí života na Zemi. Vytváří kolem Země magnetosféru, která odklání vysokoenergetické částice vycházející ze Slunce. Zdrojů magnetického pole je několik, ať už se jedná o vodič protékaný proudem, elektromagnet nebo permanentní magnet, všechny produkují magnetický tok, který je popsán siločárami magnetického pole. Hustota magnetického toku je nazývána *magnetická indukce* B . Pro zjednodušení se dá říci, že se Země chová jako magnetický dipól, má severní a jižní pól a produkuje magnetické pole o velikosti řádově 10 000 nT. Velikost pole je na různých místech zemské kůle odlišná a stále se mění. Zatímco u nás v České republice má velikost přibližně 48 000 nT a jeho velikost stále roste, nad jižním Atlantikem a částí jižní Ameriky pole za poslední půlstoletí zesláblo pod hodnotu 25 000 nT. Příčinou těchto změn jsou magnetická pole elektrických proudů generovaných slunečním větrem. Ani osa magnetického dipólu Země nesouhlasí se zemskou osou. V současné době jsou od sebe odkloněny o 11° a geomagnetický severní pól se nyní nalézá v Kanadě.[10]

Již staří Řekové pozorovali schopnost magnetovce přitahovat železo. První dochované zmínky o kompasu pochází přibližně z roku 1000 z Číny, kde byl sestrojen kompas v podobně kusu magnetovce plovoucího na destičce v nádobě s vodou. Ve 12. století pronikl kompas i do Evropy a nacházel uplatnění především jako námořní navigace. Od té doby se problematikou magnetického pole zabývalo mnoho vědců, ze kterých by se slušelo vyzdvihnout především jméno *Jamesa Clerka Maxwella*, který sjednotil popis elektrického a magnetického pole do Maxwellových rovnic.

V současné době se nabízí velké množství metod, jak měřit zemské geomagnetické pole. Problematika snímačů magnetického pole neboli *magnetometrů*, je rozebírána v první části této práce.

Tato práce se kromě snímání geomagnetického pole zabývá ještě snímači k měření statického nebo dynamického zrychlení neboli *akcelerometry*. I těchto snímačů existuje nepřehledné množství a v dalším textu bude nastíněn princip několika jejich zástupců.

Akcelerometry nabízejí široké pole působnosti. Například v automobilech, kde se starají

o správné vystřelení airbagů, dále v počítačové technice nebo mobilních přenosných zařízeních. V zařízeních pro záznam obrazu nachází své uplatnění například při stabilizaci obrazu. Využít by se daly například i v lékařství, kde by mohly pomoci lidem s ochrnutými končetinami ovládat invalidní vozík pomocí pohybů hlavy.

Cílem této práce je kromě vyhledání a nastudování informací o vhodných senzorech pro určování náklonu a orientace v prostoru také realizace modulu pro určení náklonu a orientace v prostoru. Tento modul je autorem pojmenován Position Sensing Board. Pro tuto realizaci je vybráno po jednom zástupci ze skupin akcelerometrů a magnetometrů. Dále je vybrán vhodný mikrokontrolér pro zpracovávání naměřených dat. Pro komunikaci s počítačem je zvoleno USB rozhraní a pro komunikaci s uživatelem bez potřeby počítače je zařízení osazeno LCD displejem.

2 Snímače polohy

2.1 Magnetometry

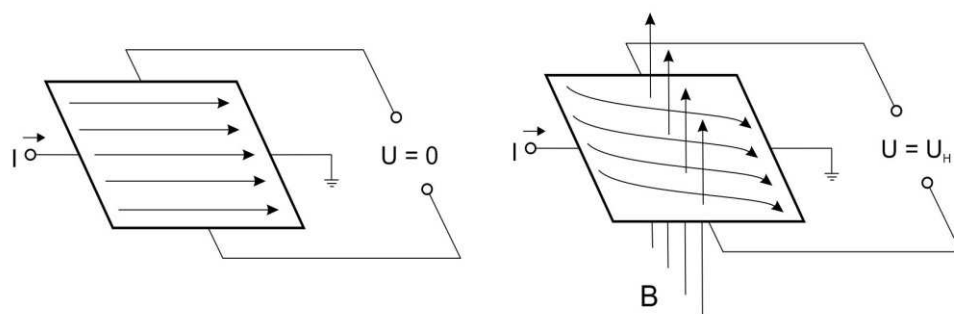
V následujících kapitolách jsou popsány nejrozšířenější typy snímačů vnějšího magnetického pole. Takovýchto druhů snímačů je velké množství, proto jsou popsány jen ty nejznámější nebo ty, které se vyrábí v integrované podobě na jednom čipu. Konkrétně se jedná o dvě skupiny snímačů. První skupina využívá princip Hallova jevu, druhá skupina využívá principu proměnného elektrického odporu vlivem vnějšího magnetického pole.

2.1.1 Magnetické senzory s Hallovým jevem

Hallův snímač je nejvíce rozšířeným typem snímače polohy. Tento elektronický snímač využívá Hallova jevu, který je založen na Lorentzově síle. Senzor je ovládaný Hallovým napětím

$$U_H = R_H \frac{BI}{l} \quad [V] \quad (2.1)$$

generovaným na elektrodách při působení magnetického pole B kolmo na elektrody polovodičové destičky o délce l , napájenou proudem I a Hallovou konstantou R_H . Zesilovač napětí U_H a obvody snímače spolu s Hallovým prvkem tvoří společně jeden integrovaný obvod o ploše přibližně $1,5 \text{ mm}^2$.



Obr. 2.1: Princip vzniku Hallova napětí

Na obr. 2.1 je znázorněno, jak Hallovo napětí U_H vzniká. V případě, že se objeví v okolí Hallova elementu magnetické pole o indukci B , které působí kolmo na polovodičovou (křemíkovou) destičku (tudíž na protékající proud I), bude na nosiče náboje působit magnetická síla F_m . Tato síla bude vychylovat nosiče náboje vždy k jedné straně, čímž se změní rozložení náboje. Na jedné straně bude větší koncentrace nosičů náboje než na druhé a tedy obě boční strany destičky budou mít rozdílný potenciál. Vzniká elektrické pole o intenzitě E a na svorkách elementu se generuje Hallovo napětí U_H , které je dáno rozdílem potenciálů na svorkách.

Jak už bylo naznačeno v úvodu kapitoly, tento druh magnetických senzorů disponuje opravdu malými rozměry a díky tomu lze použít ve velké škále aplikací, například k měření magnetického pole a jeho prostřednictvím i k měření hodnoty el. proudu či napětí nebo k měření a detekci pohybu, přiblížení nebo umístění. Typickým příkladem použití v konkrétních aplikacích jsou klávesnice, tlačítka nebo klešťové ampérmetry.

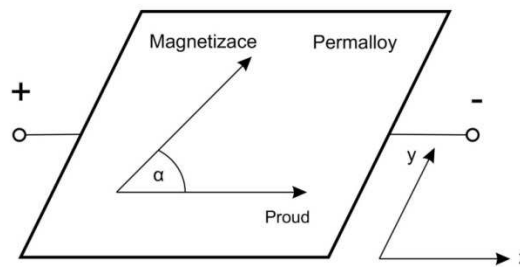
2.1.2 Magnetorezistory

Kromě známějších magnetických senzorů využívajících Hallův jev, existují i další používané principy, označované jako AMR, GMR a nejnovější TMR. Tyto senzory využívají princip proměnného odporu vlivem magnetického pole. Vyznačují se velmi vysokou citlivostí.

AMR senzory

Základem funkce AMR senzoru je tzv. AMR jev, což je zkratka anglických slov Anisotropic MagnetoResistive. Jev je založen na změně elektrického odporu velmi tenké vrstvy (filmu) permalloy (slitina železa a niklu obsahující cca 75 – 80 % niklu) vložené do podélného magnetického pole. Odpor se mění již při velmi malých hodnotách magnetické indukce, řádově μT až mT . S rostoucí hodnotou magnetické indukce odpor rychle a téměř lineárně klesá a to o cca 2 – 3 % původní (jmenovité) hodnoty odporu bez přítomnosti magnetického pole. Snímací rozsah AMR senzoru je dán tvarem, rozměrem a složením elementu.

Mimo intenzity magnetického pole má vliv i směr pole vzhledem k orientaci snímacího elementu. Bez působení magnetického pole jsou magnetické domény nasměrovány ve směru osy x (viz. obr. 2.2). Začne-li působit magnetické pole ve směru osy y , natočí se tímto směrem i domény elementu. Směr domén má vliv na velikost odporu, tedy i na procházející proud. Je-li směr proudu shodný s vektorem magnetického pole ($\alpha = 0^\circ$), odpor elementu je maximální. Jsou-li tyto směry kolmé ($\alpha = 90^\circ$), odpor je minimální.



Obr. 2.2: Princip AMR jevu

AMR senzor reaguje na podélné magnetické siločáry, v čemž se liší od senzorů na principu Hallova jevu, které reagují na kolmé magnetické siločáry vzhledem k orientaci snímače. Další vlastností AMR senzoru je, že nerozlišuje směr siločar, což znamená, že nerozlišuje severní a jižní magnetický pól.

V reálném provedení AMR senzoru se využívá zapojení čtyř snímacích odporových elementů do Wheatstonova můstku. Pro realizaci víceosé detekce se používá dvou nebo tří těchto zapojení na jednom čipu.

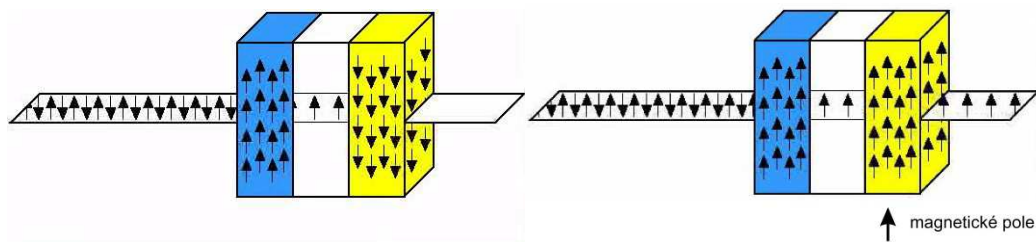
AMR senzory nejsou náhradou ani konkurentem senzorům využívající Hallův jev, jelikož reakce na magnetické pole je u obou typů rozdílná. Jsou tedy alternativou pro určité aplikace. AMR senzory mají přibližně desetkrát vyšší citlivost než Hallovy senzory. Dají se využívat například pro měření magnetického pole Země, pro detektory aktivních vodičů nebo do snímacích hlav magnetických čidel pohybu.

GMR senzory

GMR jev neboli Giant MagnetoResistive effect je dosti podobný AMR jevu. Také se zde jedná o závislost elektrického odporu a působícího magnetického pole, ale jak už název Giant (obří) napovídá, je tento jev účinnější. Změna odporu vlivem magnetického pole je u GMR jevu 10 % až 50 % jmenovité hodnoty. Další výhodou je, že GMR jev vyvolá již velice slabé magnetické pole, což znamená, že citlivost takového senzoru bude větší než u AMR.

Popsat princip GMR jevu je proti AMR jevu podstatně složitější, jelikož u GMR se již pracuje na úrovni nanovrstev a jednotlivých atomů. Základní struktura je složena z vrstev feromagnetických slitin tenkých několik nanometrů, které jsou odděleny ještě tenčí nemagnetickou vodivou vrstvou, která je často z mědi. Odpor tak tenké vrstvy mědi se dost výrazně mění v závislosti na tzv. spinu postupujících elektronů. Spin je vlastnost elementárních částic udávající směr otáčení elektronu. Může mít kladné znaménko (tzv. spin

nahoru) nebo záporné znaménko (tzv. spin dolů) v závislosti na směru rotace, při které vzniká miniaturní magnetický moment. V elektricky vodivých nemagnetických materiálech je vyrovnaný počet elektronů se spinem nahoru a dolů. Ve feromagnetických materiálech se mohou volně pohybovat jen elektrony se souhlasným směrem spinu se směrem magnetického momentu v materiálu. V případě nesouhlasného směru je elektron v materiálu zbrzděn. Působením vnějšího magnetického pole se spiny ve feromagnetických vrstvách vyrovnají, což má za následek změnu elektrického odporu celé struktury.



Obr. 2.3: Princip GMR jevu

Celý princip GMR jevu je znázorněn na obr. 2.3. Z přírodního vodiče proudí stejné množství elektronů se spinem nahoru a dolů. První feromagnetickou vrstvou (modrou) projdou elektrony jen s kladným spinem. Pokud je druhá feromagnetická vrstva (žlutá) vystavena stejnému směru magnetického pole jako první vrstva, projdou téměř všechny zbylé elektrony do výstupního vodiče. Elektrický odpor elementu je tedy nízký. V případě opačného směru působícího magnetického pole neprojde téměř žádný elektron. El. odpor elementu je tedy vysoký.

V praxi by stejná orientace vrstev a vodiče jako na obr. 2.3 nebyla výhodná z hlediska snadné integrace, proto ve skutečnosti jsou tyto vrstvy na vodič napojeny v horizontálním směru (nikoli vertikálním jako na obrázku). Toto je možné realizovat díky velmi tenké vodivé vrstvě. Elektrony procházející touto vrstvou pronikají do sousedních feromagnetických vrstev a právě tyto elektrony způsobují měřenou změnu elektrického odporu.

Na základě své funkční struktury jsou GMR senzory vždy vyráběny jako miniaturní integrované součástky. Opravdu velké využití našly GMR senzory v případě čtecích hlav harddisků. Díky zmenšení magnetické plošky disku a velmi citlivým GMR čtecím hlavám se kapacita harddisků zvětšila i za předpokladu, že velikost záznamové plochy zůstala stejná.

TMR senzory

TMR je zkratka anglických slov Tunnel Magnetoresistance. Stejně jako u AMR i GMR jevu i

tento jev funguje na principu změny odporu v závislosti na vnějším magnetickém poli. Odpor se mění o 30 %, 70 % nebo i přes 100 % své jmenovité hodnoty. Tento velký rozsah je ovšem vyklopen nelineární charakteristikou.

Na první pohled se zdá princip TMR jevu totožný s GMR jevem, ale je mezi nimi jeden velký rozdíl. U TMR jevu je mezi feromagnetické vrstvy vložena vrstva elektricky nevodivá, například oxid hliníku Al_2O_3 . Jelikož je tato vrstva opravdu velmi tenká (jen několik nanometrů), nastává zde tunelový jev a izolační vrstvou může procházet tzv. tunelový proud.

Princip funguje tak, že je-li za tenkou izolační vrstvou dostatek volných energetických hladin, mohou elektrony i s malou energií bariéru izolantu tzv. protunelovat. V tomto případě má struktura malý elektrický odpor. Pokud tam nebude dostatek volných ekvivalentních energetických hladin, tak je pravděpodobnost tunelování velmi nízká. Struktura má v takovém případě velký el. odpor. Princip tunelování je velmi rychlý, což v případě použití feromagnetických materiálů na obou stranách izolantu představuje velmi výraznou změnu el. odporu i při malých změnách působícího magnetického pole. Vliv magnetického pole na feromagnetické vrstvy a průchod proudu v závislosti na rotaci spinu je u TMR jevu stejný jako u GMR jevu.

V minulé podkapitole bylo uvedeno, že u GMR senzorů nezávisí na vzájemné orientaci struktury a přívodního vodiče (je to pouze otázka snadnější integrace), u TMR senzorů tomu už tak ale není. Přiváděný proud musí být na strukturu kolmý. V praxi se nepoužívá pouze třívrstvá struktura, na jaké byl vysvětlován princip fungování, ale vícevrstvá struktura složená z volně polarizovatelné snímací magnetické vrstvy, fixované magnetické vrstvy a tenké vrstvy dielektrika. Fixovaná magnetická vrstva se realizuje buď rozdílným magnetickým materiálem pro obě magnetické vrstvy, nebo se tato vrstva podloží další vrstvou antiferomagnetika, která udrží orientaci fixované vrstvy.

Technologie TMR disponuje vysokou citlivostí, ale bohužel nelineární charakteristikou. Proto je vhodná spíše pro komerční produkty a spotřební elektroniku, kde absolutní přesnost není prvořadá, ale jsou kladeny požadavky na vysokou citlivost z důvodu odolnosti proti vnějšímu rušení a zjednodušení elektrické konstrukce zařízení.

2.2 Akcelerometry

Akcelerometr je senzor sloužící k měření:

- **Náklonu** (úhlu) – mohou detekovat změny náklonu měřením zemské gravitace
- **Setrvačných sil** (rychlosti, vzdálenosti nebo síly) – to je možné díky vtaahům

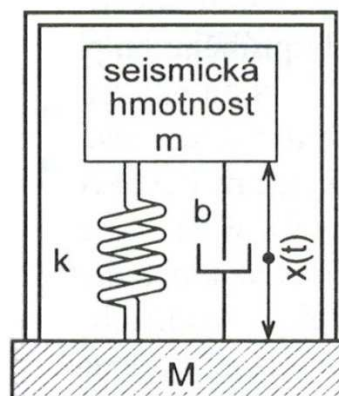
mezi zrychlením, rychlostí a vzdáleností

- **Otřesů (nárazů) nebo vibrací**

Akcelerometr měří statické nebo dynamické zrychlení. Dynamické zrychlení je takové zrychlení, které vyvolá změna pohybujícího se předmětu, v našem případě senzoru (měření setrvačných sil, otřesů a vibrací). Oproti tomu statické zrychlení vzniká působením zemské gravitace (měření náklonu). Dle počtu os podle jakých je schopen akcelerometr měřit se dělí na jednoosé, dvouosé a tříosé (někdy je toto rozdělení označováno jako 1D, 2D a 3D).

Obecně lze tyto senzory rozdělit na *relativní* a *absolutní senzory kmitavého pohybu*. Kmitavým pohybem je myšlena časová změna polohy vybraného bodu na měřeném objektu vůči vtažnému (referenčnímu) bodu. K přímému měření okamžitých hodnot polohy je tedy možné použít senzor pohybu, v tomto případě je takový senzor nazýván *relativní* (určovaná poloha je vztažena relativně k pevnému bodu). Mnohem častěji nastává ale problém s měřením pohybujících se objektů nebo objektů, ke kterým není možné nalézt vztažný bod. Z tohoto důvodu se převážně používají senzory *absolutní*, u kterých je vztažný bod vytvořen za jistých dynamických podmínek uvnitř senzoru.

Obecný model absolutního senzoru kmitavého pohybu je znázorněn na obr. 2.4. Je tvořen mechanickou kmitavou soustavou s hmotností m , označovanou jako seismická hmotnost, pružinou o tuhosti k a tlumením, které je lineárně závislé na rychlosti pohybu s konstantou úměrnosti b (tzv. viskózní tlumení).



Obr. 2.4: Obecný model absolutního senzoru

Seismická hmotnost m představuje hledaný vztažný bod uvnitř senzoru. K určení pohybu $x(t)$ je možné použít kterýkoli senzor, který umí měřit polohu. V praxi se nejčastěji používají následující tři typy akcelerometrů:

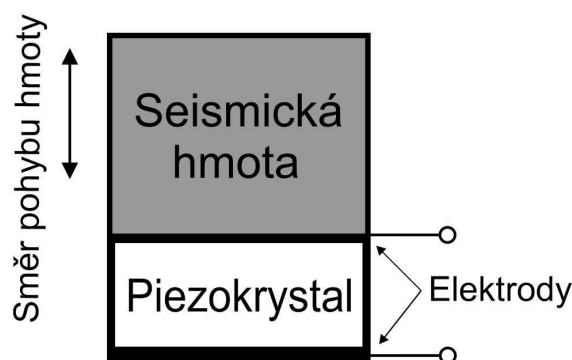
- Piezoelektrické akcelerometry
- Piezorezistivní akcelerometry
- Kapacitní akcelerometry

2.2.1 Piezoelektrické akcelerometry

Aktivním prvkem tohoto typu akcelerometru je piezoelektrický materiál. Piezoelektrický akcelerometr je tvořen dvěma hlavními částmi, jimiž jsou piezoelektrický materiál a seismická hmota. Piezoelektrický materiál je napevno připojen k základně snímače a seismická hmota je spojena s druhou stranou. Je-li senzor vystaven vibracím, vzniká síla, která působí na piezoelektrický prvek, dochází k mechanickému namáhání krystalů a důsledkem piezoelektrického jevu vzniká náboj, resp. napětí na elektrodách senzoru. Tato síla je dle druhého Newtonova pohybového zákona rovna seismické hmotnosti vynásobené působícím zrychlením.

Vlastní rezonanční frekvence akcelerometru je vysoká (až 250 kHz), díky tomu lze tento typ akcelerometru použít k měření při vysokých hodnotách frekvence kmitání hmoty. Lze použít do vysokých hodnot dynamického zrychlení a to až 20 000 g. Naopak statické zrychlení tímto typem měřit nelze, jelikož vzniklý náboj se vybíjí přes vnitřní odpor elementu a svody.

Piezoelektrické akcelerometry mají zastoupení výhradně v průmyslových aplikacích, obzvláště ve strojírenství a geologickém výzkumu. Jejich konstrukce je výrobně jednodušší. Zrychlení měří pouze v jedné ose.

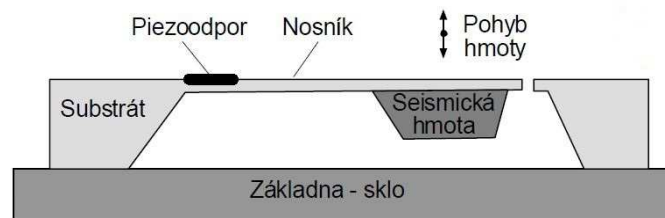


Obr. 2.5: Princip piezoelektrického akcelerometru

2.2.2 Piezorezistivní akcelerometry

Principem piezorezistivních akcelerometrů je opět zavěšení seismické hmoty na pružinu upevněnou k rámu. V případě pohybu rámu má hmota tendenci zůstat v klidu až do doby, kdy napnutá pružina předá dostatek síly hmotě k pohybu. Síla působící na pružinu je úměrná deformaci, deformace je úměrná měřenému zrychlení.

V případě křemíkových akcelerometrů je mechanický systém pružiny a hmoty nahrazován křemíkovým konzolovým nosníkem se seismickou hmotou na volném konci. Je-li senzor vystaven vibracím, dochází k prodlužování nebo zkracování piezorezistivního elementu a tím nastává změna ohmického odporu (princip tenzometru), která je úměrná výchylce hmoty. Tento element je umístěn blízko pevného konce nosníku, kde je mechanické napětí největší. K přeměně změny odporu na napětí se využívá Wheatstonova můstku.



Obr. 2.6: Princip piezorezistivního akcelerometru [převzato z [2]]

Výhodou piezorezistivních akcelerometrů je spodní hranice měřitelnosti blízká nule a velká citlivost. Naopak nevýhodou je značná závislost na teplotě, kterou je však možné kompenzovat. Využívají se zejména v automobilovém průmyslu, vojenské a vesmírné technice.

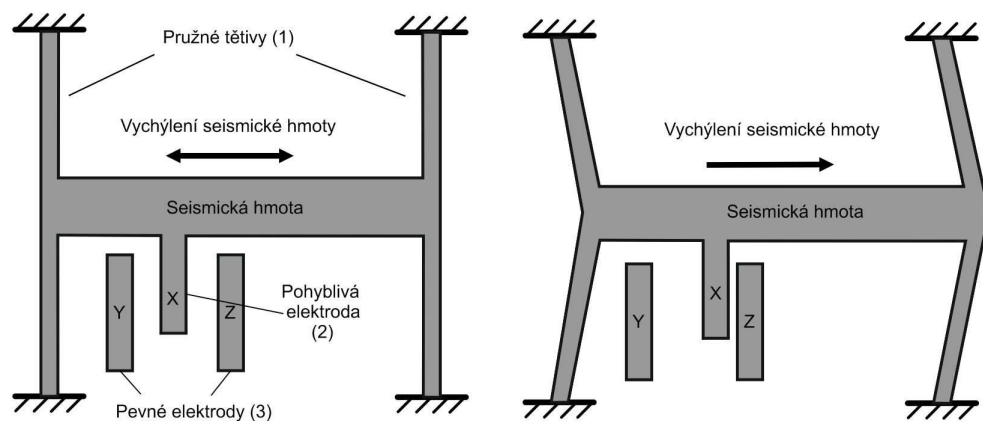
2.2.3 Kapacitní akcelerometry

Funkce kapacitních akcelerometrů je založena na proměnné kapacitě tříelektrodového vzduchového kondenzátoru. Mechanický kmitavý obvod u kapacitních akcelerometrů je složen z tenké membrány s vhodně tvarovanými spirálovými štěrbinami a několika otvory. Tenká membrána je umístěna mezi nepohyblivými elektrodami diferenciálního kapacitního senzoru s počátečními vzduchovými mezerami. Je-li membrána v pohybu, pumpuje vzduch paralelně k rovině elektrod před otvory v membráně. Tímto způsobem vzniká obdoba viskózního tlumení.

MEMS akcelerometry

Základ MEMS akcelerometru tvoří destička z polykrystalického křemíku, tvarovaná do dvou pružných tětív (1), ukotvených na monokrystalickém křemíkovém substrátu. Obě tětivy jsou spojeny hřebínkem, který představuje seismickou hmotnost m . Tětivy představují tuhost k mechanického oscilátoru. Každý ze zubů hřebínku představuje střední pohyblivou elektrodu X (2) soustavy tvořené stejným počtem diferenciálních kapacitních senzorů s proměnnou vzduchovou mezerou. Jako nepohyblivé (pevné) elektrody slouží systém nosníků Y, Z (3). Při působení horizontálního zrychlení např. ve směru doprava se zvýší kapacita mezi elektrodami X, Z a poklesne mezi elektrodami X, Y.

Princip fungování hřebenovitěho kapacitního akcelerometru je znázorněn na obr. 2.7.



Obr. 2.7: Princip MEMS akcelerometru

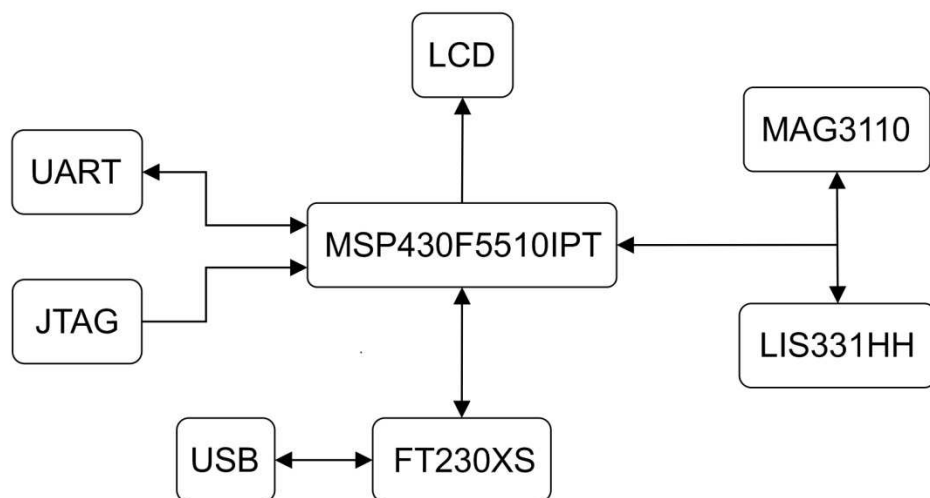
Takováto struktura dokáže měřit zrychlení pouze v jedné ose. V případě dvouosého akcelerometru se používají na jednom čipu tyto struktury dvě s tím, že jsou vzájemně pootočené o 90° . Pro vytvoření tříosého akcelerometru je zapotřebí přidat ještě třetí pohyblivou strukturu, které se bude pohybovat se směru osy z.

Kapacitní akcelerometry jsou v dnešní době nepoužívanější. Díky velmi malým rozměrům (např. $3 \times 3 \times 1$ mm) a malé spotřebě nachází uplatnění zejména u bateriově napájených zařízení.

3 Popis zařízení Position Sensing Board

V této kapitole je popsán navržený modul pro určení náklonu a orientace v prostoru, který je autorem pojmenován Position Sensing Board. Zařízení čte z akcelerometru data obsahující informaci o náklonu zařízení a z magnetometru data obsahující informaci o orientaci v prostoru, konkrétně informaci o tom, kterým směrem se nachází severní geomagnetický pól Země. Data jsou zpracovávána mikrokontrolérem a zobrazována na LCD displej. Tato kapitola je rozdělena na tři hlavní podkapitoly. V první je popsáno ovládání zařízení a v dalších dvou je popisována hardwarová část a softwarová část.

Při návrhu byl kladen důraz na kompaktnost, nízký odběr celého zařízení a nízkou hodnotu napájecího napětí (do 3V). Jako napájecí člen slouží sériové zapojení dvou galvanických článků, běžně označovaný jako mikrotužková baterie velikosti AAA, které jsou schopny dodat přibližně 3V. Mozkem celého zařízení je mikrokontrolér od firmy Texas Instruments MSP430F5510IPT. Z řad magnetometrů byl vybrán tří-osý digitální magnetometr MAG3110 od firmy Freescale Semiconductor. Jako zástupce akcelerometrů byl vybrán tří-osý digitální akcelerometr LIS331HH, založený na MEMS technologii, vyráběný firmou STMicroelectronics. Sensory komunikují s mikrokontrolérem přes sériovou sběrnici I²C.

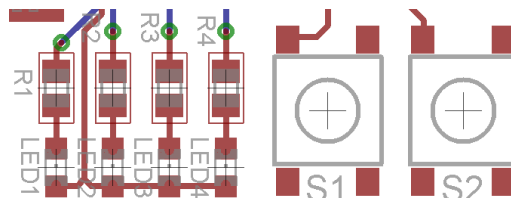


Obr. 3.1: Blokové schéma zařízení Position Sensing Board

Zařízení je osazeno grafickým LCD displejem. Komunikace mezi displejem a mikrokontrolérem je zprostředkována sériovou periferií SPI. Pro komunikaci s počítačem je na desce osazen obvod FT230XS od firmy FTDI Chip, který převádí sériovou periferii UART na straně mikrokontroléru na sériovou komunikaci USB na straně počítače. Pro případné další využití je z mikrokontroléru vyvedena další sériová periferie UART. FLASH paměť je programována přes rozhraní JTAG.

3.1 Popis ovládání zařízení

Po uvedení zařízení do provozu posuvným spínačem VYP je rozsvícena LED dioda LED1 signalizující zařízení v aktivním stavu.



Obr. 3.2: Signalizační a ovládací prvky zařízení

Tlačítka S1 a S2 je volen pracovní režim zařízení. Tlačítkem S1 je volen režim akcelerometru. V tomto režimu jsou zpracovávána data pouze z akcelerometru. Tento režim signalizuje kromě údaje na displeji ještě rozsvícená LED dioda LED2. Tlačítkem S2 je volen režim magnetometru a signalizován rozsvícenou LED diodou LED3. V tomto režimu pracuje mikrokontrolér pouze s magnetometrem.

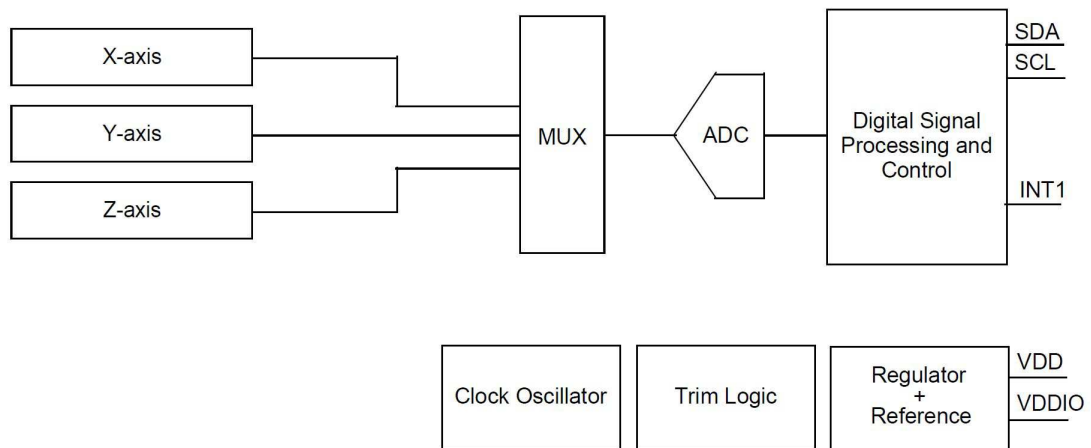
Na LCD displeji jsou zobrazována kromě informace o aktivním režimu ještě získaná naměřená data z jednotlivých os akcelerometru či magnetometru.

3.2 Popis hardwaru

3.2.1 Magnetometr MAG3110FCR1

MAG3110 je velmi malý, digitální 3-osý magnetometr, založen na TMR technologii. Měří tři složky lokálního magnetického pole, které je tvořeno součtem pole geomagnetického a hard-iron pole, způsobeného dílčími součástmi na konkrétní desce plošného spoje nebo permanentními magnety. Hard-iron pole je možné kompenzovat uživatelsky nastavitelným

hard-iron ofsetem. Snímač je schopen měřit magnetické pole s výstupní vzorkovací rychlostí ODR do 80 Hz. Tato výstupní vzorkovací rychlost odpovídá vzorkovacím intervalům od 12,5 ms do několika sekund. Napájecí napětí (Vdd) je v rozsahu od 1,95 V do 3,6 V a napájecí napětí I/O rozhraní je od 1,65 V do Vdd. Magnetometr má mimořádně nízký proudový odběr, přibližně 24 μA při běžném provozu na 1,25 Hz. Snímač je schopen měřit magnetická pole až do velikosti $\pm 1000 \mu\text{T}$, s citlivostí 0,1 $\mu\text{T}/\text{LSB}$. Magnetometr je dodáváný v DFN pouzdře s deseti vývody. Garantovaná funkčnost snímače je v teplotním rozsahu od -40°C do $+85^\circ\text{C}$. Snímač je vybaven I2C sériovým rozhraním a jedním interruptem.



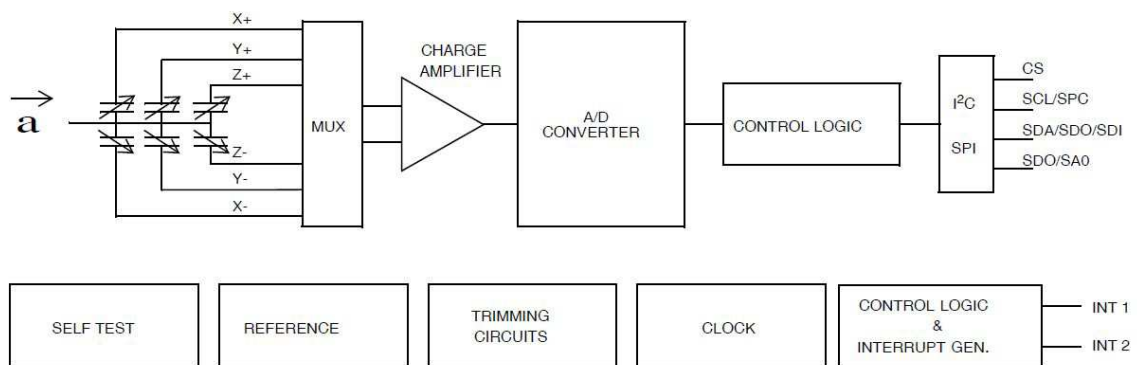
Obr. 3.3: Blokové schéma magnetometru MAG3110 [Převzato z [6]]

Jak již bylo zmíněno v úvodu kapitoly, magnetometr je propojen s mikrokontrolérem přes I²C sériovou sběrnici. I²C sběrnice je obecně realizována dvěma vodiči SDA a SCL. SDA slouží pro duplexní přenos dat, SCL pro přenos hodinového signálu, který vždy generuje MASTER. Vodiče jsou připojeny na periferii mikrokontroléru B1, konkrétně SDA na pin 30 (P4.1) a SCL na pin 31 (P4.2). Sběrnice I²C je založena na budičích s otevřenými kolektory, tudíž je zapotřebí, aby při neaktivním stavu všech připojených budičů byla na obou vodičích sběrnice vysoká úroveň H. To je zajištěno tzv. pull-up rezistory, přes které je sběrnice připojena na napájecí napětí. Velikost těchto odporů je závislá na počtu připojených zařízení, celkové kapacitě sběrnice a kmitočtu hodinových impulzů. V našem případě byla zvolena hodnota těchto rezistorů na 4,7 k Ω (R14, R15), jelikož máme na sběrnici připojené dvě zařízení a pro přenos je využíváno Standard módu, jehož frekvence je 100 kHz.

Na obr. 3.4 je schéma zapojení magnetometru. Na napájecím vodiči jsou připojeny blokovací kondenzátory C15 a C16. Tyto blokovací kondenzátory jsou pro správnou činnost snímače umístěny co nejbližší pinu 2. Kondenzátor C14 slouží jako filtrační kondenzátor pro

3.2.2 Akcelerometr LIS331HH

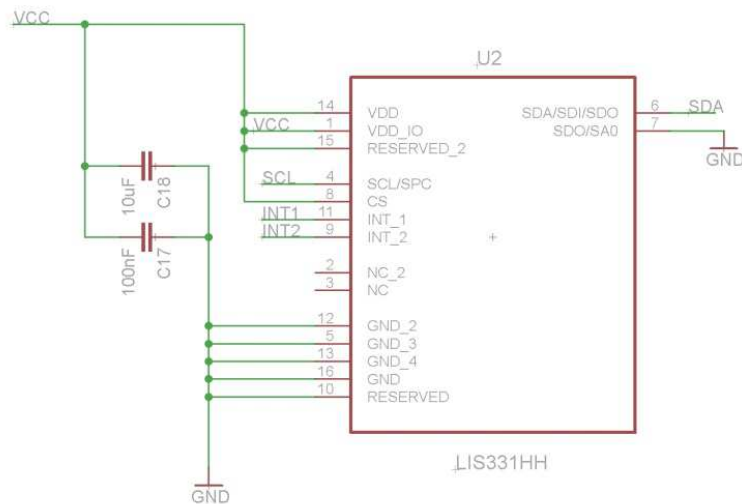
LIS331HH je 3-osý, lineární, MEMS akcelerometr s velmi nízkou spotřebou, vyráběný v LGA pouzdře s 16 vývody. Napájecí napětí snímače je v rozsahu od 2,16 V do 3,6 V. Zařízení má uživatelsky přepínatelné měřící rozsahy $\pm 6g/\pm 12g/\pm 24g$. V Ultra low-current módu má senzor proudovou spotřebu nižší než 10 μA . Senzor má digitální výstup s volitelnou výstupní vzorkovací rychlostí od 0,5 Hz do 1 kHz. Je vybaven dvěma nezávisle programovatelnými interrupty, které jsou k dispozici současně na dvou různých pinech. Snímač je schopen pracovat v teplotním rozsahu od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$. Kompletní zařízení obsahuje snímací prvek a IC schopné přijmout informace od snímacího prvku a poskytovat signál do vnějšího světa prostřednictvím I²C nebo SPI sériového rozhraní, což je výhodné zejména pro přímé připojení s mikrokontrolérem.



Obr. 3.6: Blokové schéma akcelerometru LIS331HH [Převzato z [5]]

Kompletní měřící řetězec se skládá ze snímacího prvku, založeného na MEMS principu, dále nízko-šumového kapacitního zesilovače, který převádí kapacitu z MEMS snímače na analogové napětí a to je přivedeno na A/D převodník. Za A/D převodníkem putuje signál již v digitální podobě do řídicí logiky.

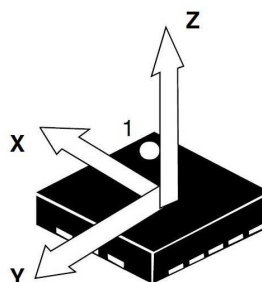
IC rozhraní je továrně kalibrováno na hodnoty uvedené v katalogovém listě. Tyto hodnoty jsou uloženy v energeticky nezávislé paměti a po každém spuštění zařízení se tyto hodnoty zkopírují do patřičných registrů. To umožňuje používat zařízení bez další kalibrace.



Obr. 3.7: Schéma zapojení akcelerometru

Jelikož magnetometr umožňuje komunikaci pouze po I²C, je vhodné na tuto sběrnici připojit i akcelerometr a tím ušetřit jednu periferii mikrokontroléru. Akcelerometr využívá také 7-bitovou adresu. Zařízení umožňuje měnit poslední bit adresy pro případ použití dvou stejných zařízení na jedné sběrnici. Je-li pin 7 uzemněn, LSB bude mít hodnotu 0, je-li připojen na napájecí napětí, pak bude mít LSB hodnotu 1. V navrženém zařízení je pin uzemněn, takže adresa akcelerometru je 0x18. Výstupní naměřená data z jednotlivých os jsou 16 bitová a vyjádřena ve dvojkovém doplňku. Uložena jsou na adresách registrů 0x28 až 0x2D.

Kondenzátory C17 a C18 plní funkci blokovacích kondenzátorů. Stejně jako u magnetometru nejsou interrupty využívány, ale pro případ možného budoucího využití jsou přivedeny na piny 19 (P1.5) a 21 (P1.7) mikrokontroléru.



Obr. 3.8: Orientace akcelerometru – horní pohled [Převzato z [5]]

Citlivost snímače

Citlivost snímače může být určena působením na snímač zrychlením 1 g. Stejněsměrné zrychlení můžeme lehce změřit tak, že nasměrujeme měřenou osu do středu Země, poznamenejeme si výstupní hodnoty, otočíme snímač o 180 stupňů (vzhledem k obloze) a

znovu si poznamenejme výstupní hodnoty. Tím je na snímač použito zrychlení ± 1 g. Odečtením vyšší hodnoty od nižší a vydělením výsledku 2, dostáváme aktuální citlivost snímače. Tato hodnota se v čase a změnou teploty mění jen velmi málo, tudíž se dá konstatovat, že je časově a teplotně stálá. U tohoto akcelerometru je v katalogovém listě udávána hodnota citlivosti $\pm 0,01$ %/°C.

Zero-g úroveň

Zero-g úrovněový ofset popisuje odchylku skutečného výstupního signálu od ideálního výstupního signálu, nepůsobí-li na snímač žádné zesílení. Snímač v ustáleném stavu a na vodorovném povrchu bude měřit zrychlení 0 g na horizontálních osách X i Y, zatímco na ose Z bude měřit zrychlení 1 g. Výstup je v ideálním případě uprostřed dynamického rozsahu snímače. Odchylka od ideální hodnoty se v tomto případě nazývá Zero-g ofset. Ofset je do jisté míry důsledkem namáhání MEMS snímače, tudíž může být lehce změněn po připájení snímače na desku plošného spoje nebo vystavením rozsáhlému mechanickému namáhání. Ofset je teplotně závislý parametr, konkrétně v tomto případě se mění o $\pm 0,4$ mg/°C.

Self-test

Self-test umožňuje zkontrolovat funkci snímače, aniž by byl senzor v pohybu. Je-li tato funkce zapnuta, simuluje se na snímač určité vstupní zrychlení. V tomto případě budou výstupy snímače vykazovat změnu ve stejnosměrných úrovních, které jsou vztaheny k vybranému rozsahu citlivosti přístroje. Výstupní úroveň je dána algebraickým součtem signálů produkovaných zrychlením působícím na snímač a elektrostatickou zkušební silou. Jestliže se výstupní signály mění v mezích uvedených v katalogovém listě, pak snímač pracuje správně.

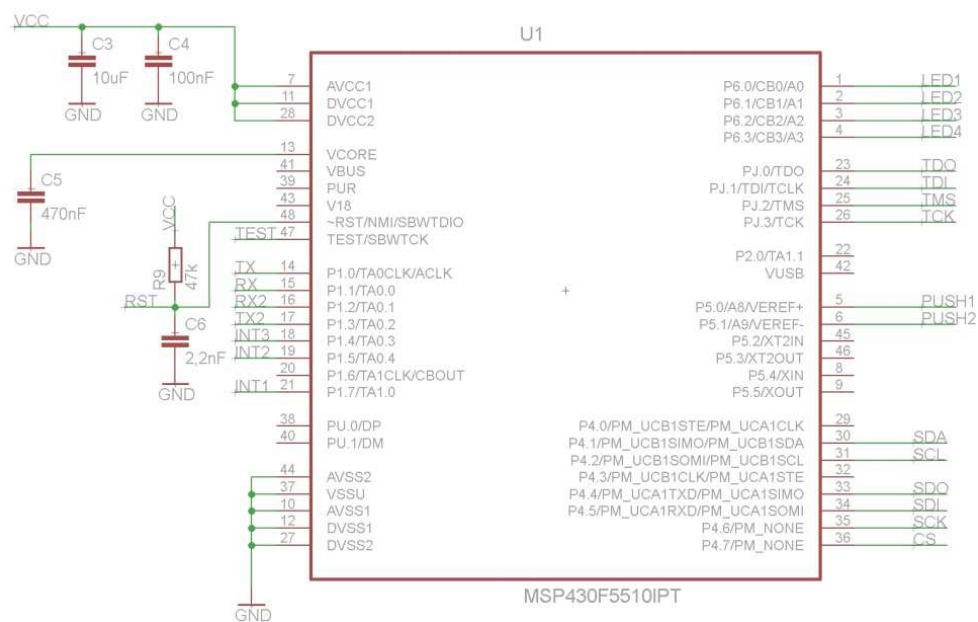
Režim spánku

Funkce spánku ve spojení s režimem nízké spotřeby energie umožňuje snížit spotřebu systému, což je výhodou zejména bateriově napájených zařízení. LIS331HH umožňuje nastavit operační režim s nízkou spotřebou energie charakterizovaný nižší přenosovou rychlostí. V praxi to znamená, že i když je zařízení tzv. uspané, pořád snímá zrychlení a generuje interruptové požadavky. Funkce probuzení je automaticky aktivována, jakmile je zaznamenán interruptový požadavek a výstupní vzorkovací rychlost a šířka pásma opět vzroste na původní hodnotu.

3.2.3 Mikrokontrolér MSP430F5510IPT

Tento mikrokontrolér, nabízí výkonný 16-bitový RISC procesor schopný pracovat až na frekvenci 25 MHz. Je vybaven 16-bitovými registry a konstantními generátory, které přispívají k maximální účinnosti kódu. Digitálně řízený oscilátor (DCO) umožňuje probuzení z low-power režimů do aktivního režimu za méně než 5 μ s. Architektura v kombinaci s rozsáhlými low-power režimy, je optimální pro dosažení delší životnosti baterie v přenosných zařízeních. Mikrokontrolér má integrované USB-PHY podporující USB 2.0 (v návrhu však není toto USB rozhraní využíváno, ke komunikaci je využíváno USB převodníku FT230XS). Dále obsahuje programovou paměť typu FLASH o velikosti 32 KB, RAM paměť o velikosti 6 KB, čtyři 16-bitové čítače, komparátor, 10-bitový A/D převodník, dvě univerzální sériové komunikační rozhraní (USCI), hardwarovou násobičku podporující 32-bitové operace, tři kanálový vnitřní DMA řadič a 31 I/O pinů.

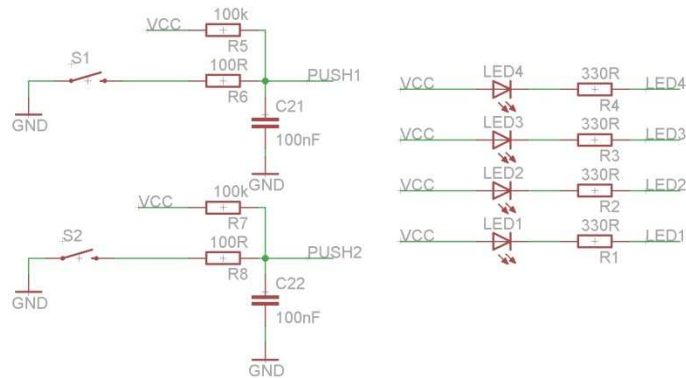
Mikrokontrolér je možné napájet v rozmezí od 1,8 V do 3,6 V. Čip je schopen pracovat v rozsahu teplot od -40 °C do $+85$ °C. Je vyráběn v LQFP pouzdře s 48 vývody.



Obr. 3.9: Schéma zapojení mikrokontroléru

Kondenzátory C3 a C4 plní funkci blokovacích kondenzátorů. Pin 13 s označením Vcore slouží k regulaci napájecího napětí jádra mikrokontroléru. Na tento pin je připojen kondenzátor C5 o velikosti 470 nF. Tato hodnota je doporučena v katalogovém listě.[4] Na bránu P6 jsou připojeny signalizační LED diody. LED diody jsou připojeny anodami na napájecí napětí a přes odpory o velikostech 330 Ω připojeny na piny mikrokontroléru. LED dioda bude tedy svítit v případě, když na pinu mikrokontroléru bude nízká úroveň L. Na piny

5 (P5.0) a 6 (P5.1) jsou připojena tlačítka. V případě stisknutí tlačítka je na pin mikrokontroléru vnucena nízká úroveň L. Piny 16 (P1.2) a 17 (P1.3) jsou vyvedeny na kraj desky na kolíkovou lištu pro možné budoucí připojení jiného zařízení přes komunikační rozhraní UART. Využití ostatních pinů mikrokontroléru bylo již popsáno výše v textu nebo teprve bude popsáno v textu následujícím.

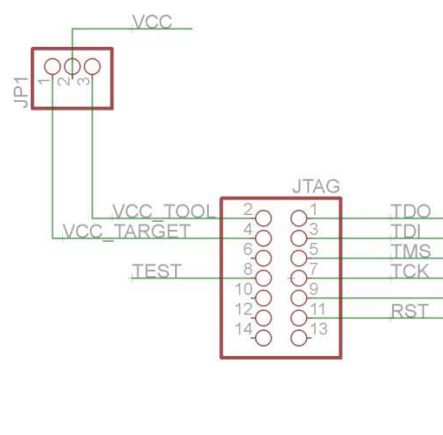


Obr. 3.10: Schéma zapojení LED diod a tlačítek

JTAG rozhraní

FLASH paměť mikrokontroléru je programována programátorem MSP-FET430UIF přes JTAG rozhraní. FLASH paměť je programována po jednotlivých adresách, ale mazána musí být celá najednou. Z tohoto důvodu jsou FLASH paměti o velké kapacitě rozdělovány do n sektorů. Tyto sektory lze programovat nebo mazat samostatně. Velikost těchto sektorů u mikrokontroléru MSP430F5510IPT je 512 bytů. Kromě těchto hlavních sektorů obsahuje FLASH paměť ještě čtyři sektory informační paměti. Tyto sektory mají velikost 128 bytů.

Zařízení je možno při programování napájet buď přes programátor nebo z baterií. Tato možnost volby je realizována součástkou JP1. Jsou-li spojeny piny 1 a 2, tak je zařízení napájeno přes programátor, v případě spojení pinů 2 a 3 je zařízení napájeno z baterií.



Obr. 3.11: Schéma zapojení JTAG rozhraní

JTAG rozhraní vyžaduje čtyři signály pro vysílání nebo příjem dat. Tyto signály jsou v mikrokontroléru sdíleny s I/O piny. Popis jednotlivých pinů je v tab. 3.1.

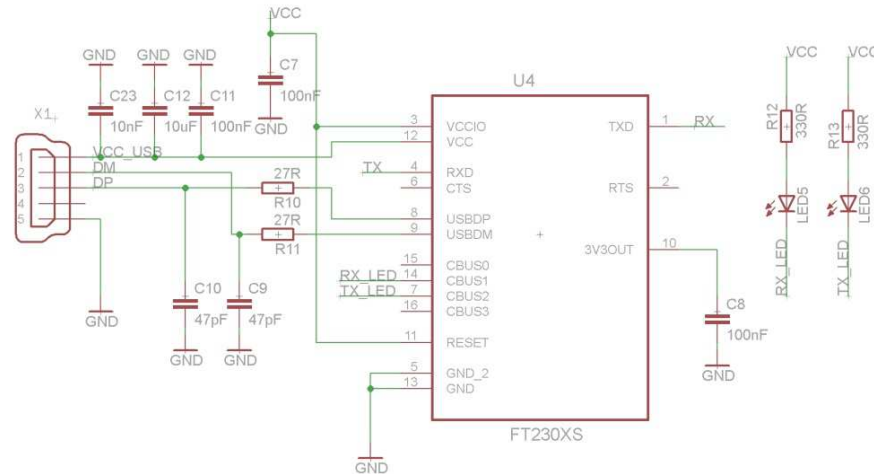
Signál	Pin mikrokontroléru	Směr	Funkce
TDO	23 (PJ.0)	OUT	Výstupní data
TDI	24 (PJ.1)	IN	Vstupní data
TMS	25 (PJ.2)	IN	Řízení stavů
TCK	26 (PJ.3)	IN	Vstupní hodinový signál
RST	48 (RST)	IN	Externí reset
TEST	47 (TEST)	IN	Povolení JTAG signálu
VCC_TOOL			Napájení z programátoru
VCC_TARGET			Napájení z baterií
GND			Zem

Tab. 3.1: Popis pinů rozhraní JTAG

3.2.4 Obvod FT230X

Obvod slouží jako převodník USB na UART komunikační rozhraní. Tento obvod dostal přednost před integrovaným USB v mikrokontroléru z důvodu snadné komunikace mezi mikrokontrolérem a počítačem. Po nainstalování ovladačů a připojení obvodu k počítači, je vytvořen v operačním systému Windows virtuální sériový port, na který je možné přistupovat jako na fyzické sériové porty v počítači.

Samotný obvod je napájen přes USB sběrnici (5 V). Toto napětí je přivedeno na vstup VDD. Jelikož je obvod nutné přizpůsobit napěťovým hladinám mikrokontroléru, je na vstup VCCIO přivedeno stejná napětí jako na mikrokontrolér. Pro komunikaci s mikrokontrolérem jsou využity vodiče TX a RX, přivedené na pin 14 (P1.0) a 15 (P1.1) mikrokontroléru. Obvod je vybavený interním stabilizátorem na 3,3 V (pin 10 označení 3V3OUT), schopným dodávat maximální proud 50 mA, celé zařízení je ale napájeno z baterií, tudíž je tento výstup přes kondenzátor C8 o velikosti 100 nF přiveden na zem. Dále je obvod vybaven vnitřním 12 MHz oscilátorem. CBUS I/O piny mohou být využity na mnoho funkcí (podrobný seznam těchto možností v [7]). V návrhu je využito dvou pinů pro připojení LED diod (LED5 a LED6), signalizujících přenos po sériové komunikaci a jsou stejně jako LED diody u mikrokontroléru aktivní v nízké napěťové úrovni L. Kondenzátory C7, C11, C12 a C23 plní funkci blokovacích kondenzátorů.

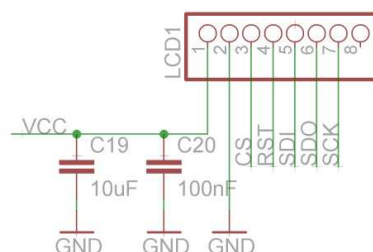


Obr. 3.12: Schéma zapojení obvodu FT230XS

3.2.5 LCD displej

Použitý grafický LCD displej pochází původně z mobilního telefonu nokie 5110. Je umístěn na samostatné PCB a přes kolíkovou lištu a dutinkovou lištu připojen k základní desce zařízení. Používá low-power CMOS LCD řadič PCD8544. Displej má rozlišení 48 x 84 bodů a obsahuje statickou RAM paměť k ukládání zobrazovaných dat. RAM paměť je rozdělena do šesti bank po 84 bytech. Napájecí napětí vnitřní logiky je v rozsahu od 2,7 V do 3,3 V. Na PCB se nachází i LED diody pro podsvícení displeje, které je přivedené na pin 8. V návrhu ale není podsvícení využíváno, z důvodu bateriového napájení, které je schopno dodat v ideálním případě maximálně 3V, které pro tuto funkci nejsou dostačující.

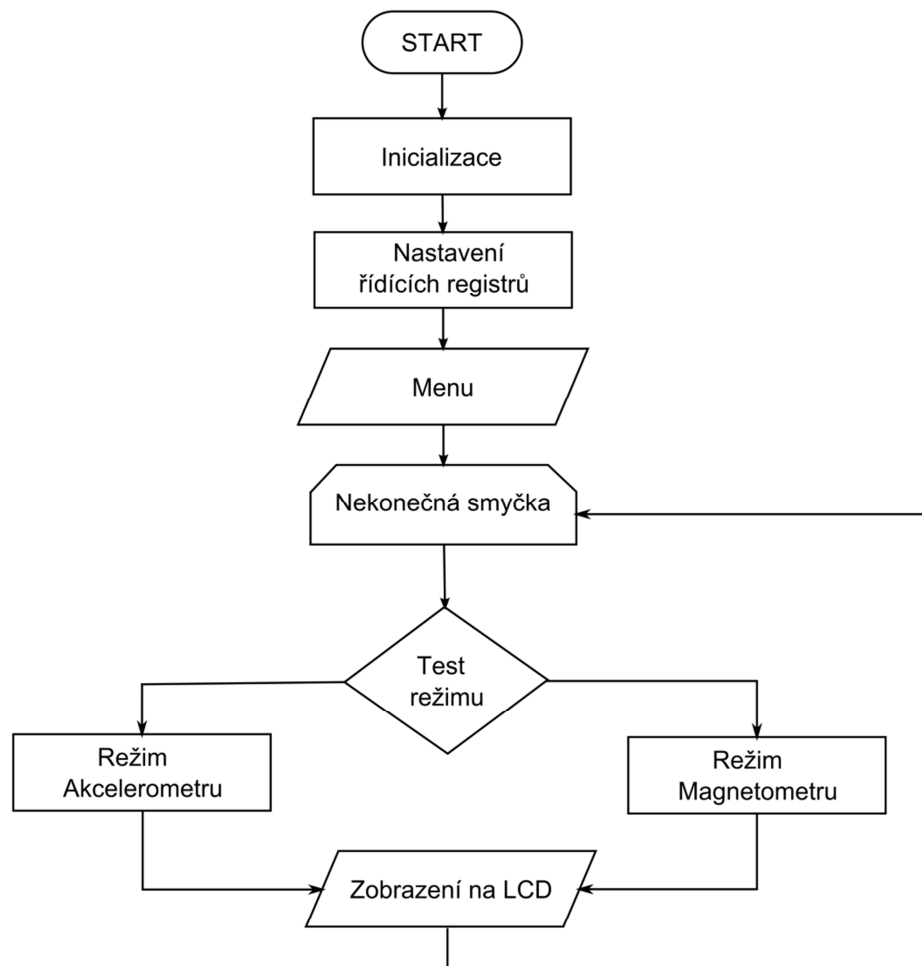
Displej je připojen na periférii mikrokontroléru A1 a propojen přes sériovou sběrnici SPI. SPI komunikace je realizována čtyřmi vodiči. Pro obousměrný provoz je zapotřebí dvou vodičů. Pro přenos dat slouží vodiče s označením SDO (pin 33 (P4.4) mikrokontroléru) a SDI (pin 34 (P4.5)) pro opačný přenos dat. Synchronizační hodinové pulzy vysílané mikrokontrolérem jsou posílány po vodiči SCK (pin 35 (4.6)). Poslední vodič slouží pro výběr slave zařízení, se kterým chce mikrokontrolér komunikovat a je označen CS (pin 36 (4.7)). Kondenzátory C19 a C20 plní funkci blokovacích kondenzátorů.



Obr. 3.13: Schéma zapojení LCD displeje

3.3 Popis programu

Program je vytvořen ve vývojovém prostředí Code Composer Studio verze 5.3.0. V programu jsou využívány knihovny vytvořené firmou Texas Instruments, které jsou volně dostupné na internetových stránkách firmy. Průběh programu je znázorněn ve vývojovém diagramu na obr. 3.14.



Obr. 3.14: Vývojový diagram programu

Po startu programu je nejprve potřeba inicializovat v bloku [Inicializace] SPI sériovou komunikaci a následně LCD displej, jelikož po uvedení zařízení do provozu je obsah všech vnitřních registrů a RAM paměti řadiče náhodný. Dále je inicializována I²C komunikace. V další části programu [Nastavení řídicích registrů] jsou nastaveny řídicí registry obou snímačů. U magnetometru je možné například nastavovat ODR a OSR, vypnutí/zapnutí kompenzace hard-iron offsetu atd., více v [6]. U akcelerometru je možné nastavovat vypnutí/zapnutí high pass filtru, měřící rozsah, režimy sníženého příkonu atd., více v [5]. U obou snímačů je ale bezpodmínečně nutné nastavit aktivní mód, jinak jsou zařízení vypnuta.

Po správné inicializaci a nastavené řídicích registru je na displej zobrazeno úvodní menu v bloku [Menu], které vybízí uživatele k vybrání pracovního režimu zařízení (popis ovládání zařízení je v podkapitole 3.1). Po vybrání režimu jsou čtena data z konkrétního snímače v bloku [Režim akcelerometru] nebo [Režim magnetometru]. Následně jsou tyto data zobrazována na displej v bloku [Zobrazení na LCD]. V následujícím textu jsou tyto bloky popsány podrobněji.

3.3.1 Seznam a popis funkcí

- *void i2c_device_init(void)* – Funkce nemá návratovou hodnotu, ani žádný parametr. Nastavuje, jaké piny periferie jsou pro tuto komunikaci využívány, inicializuje zařízení typu master (jaká periferie je využívána, zdroj hodinového signálu, kmitočet tohoto hodinového signálu a kmitočet synchronizačních impulsů (SCL)). Na konci této funkce je povolena činnost I²C modulu.
- *void i2c_setSlaveRegister(unsigned char reg, unsigned char value)* – Funkce bez návratové hodnoty se dvěma parametry. Funkce má za úkol nastavit registr zařízení typu slave. Cílový registr je vybírán vstupní proměnnou *reg* a požadované nastavení registru je nastavenou vstupní proměnnou *value*.
- *unsigned char i2c_singleRecivedData(unsigned char reg)* – Funkce s návratovou hodnotou datového typu unsigned char. Funkce vrací obsah registru ze zařízení slave. Registr, ze kterého má být čteno, je vybrán parametrem funkce *reg*.
- *void readXakcel(void)* – Funkce bez návratové hodnoty a parametru. Funkce čte naměřená 16-bitová data z osy x. Data jsou rozdělena ve snímači do dvou 8-bitových registrů. Postupně jsou tyto registry přečteny funkcí *i2c_singleRecivedData()*, obsahy těchto registrů jsou složeny do jednoho 16-bitového čísla a toto číslo je uloženo do globální proměnné xDATA.
- *void readYakcel(void)* – Funkce bez návratové hodnoty a parametru. Tato funkce vykonává stejné instrukce jako funkce *readXakcel()*, s tím rozdílem, že výsledná hodnota je uložena do globální proměnné yDATA.
- *void readZakcel(void)* – Funkce bez návratové hodnoty a parametru. Tato funkce vykonává stejné instrukce jako funkce *readXakcel()*, s tím rozdílem, že výsledná hodnota je uložena do globální proměnné zDATA.
- *void readXmag(void)* – Funkce bez návratové hodnoty a parametru. Tato funkce vykonává stejné instrukce jako funkce *readXakcel()*.

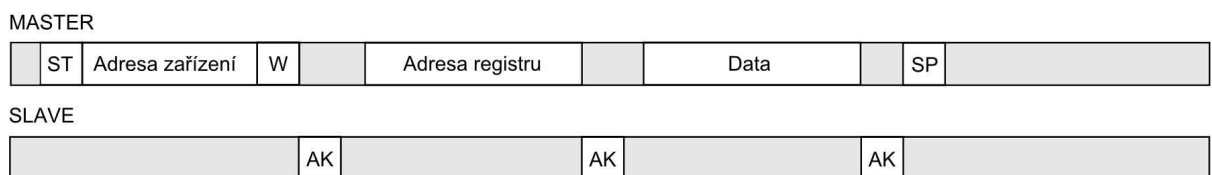
- *void readYmag(void)* – Funkce bez návratové hodnoty a parametru. Tato funkce vykonává stejné instrukce jako funkce *readXakcel()*, s tím rozdílem, že výsledná hodnota je uložena do globální proměnné *yDATA*.
- *void readZmag(void)* – Funkce bez návratové hodnoty a parametru. Tato funkce vykonává stejné instrukce jako funkce *readXakcel()*, s tím rozdílem, že výsledná hodnota je uložena do globální proměnné *zDATA*.
- *void SPI_device_init(unsigned long baudrate)* – Funkce bez návratové hodnoty. Funkce má za úkol inicializovat SPI komunikaci. Nejdříve je nastavena periférie, která bude zprostředkovávat SPI komunikaci a jsou přiřazeny konkrétní funkce jednotlivým pinům mikrokontroléru. Poté se inicializuje zařízení typu master (jaká periférie je využívána, zdroj hodinového signálu, kmitočet tohoto hodinového signálu, kmitočet synchronizačních impulzů, první vysílaný znak (MSB nebo LSB), fáze a polarita hodinových impulzů). Parametrem funkce, proměnnou *baudrate*, je nastavován kmitočet synchronizačních impulzů (SCK). Na konci této funkce je povolena činnost SPI modulu.
- *void LCD_send(unsigned char data, char DC)* – Funkce bez návratové hodnoty. Funkce zprostředkovává vysílání dat od master do slave. Parametrem funkce *DC* je volen druh vysílaných dat, zda se jedná o data (hodnota parametru je 1) nebo příkaz (hodnota parametru je 0). Do parametru *data* jsou uložena data, které chceme odvysílat.
- *void LCD_initDisplay(void)* – Funkce bez návratové hodnoty a parametru. Tato funkce má za úkol nastavení řídicích registrů řadiče LCD displeje po náběhu napájení.
- *void LCD_xy(unsigned char x, unsigned char y)* – Funkce bez návratové hodnoty. Parametry funkce *x* a *y* je nastavována pozice kurzoru na displeji.
- *void LCD_clear(void)* – Funkce bez návratové hodnoty a parametru. Funkce slouží k vymazání zobrazených dat na displeji.
- *void LCD_print_char(char value)* – Funkce bez návratové hodnoty. Funkce posílá řadiči displeje informaci o tom, jaký znak má zobrazit. Tato funkce není využívána k přímému zobrazení znaku na displej, není zde totiž definováno, kam se má znak zobrazit. Slouží jako pomocná funkce funkci následující.
- *void LCD_print(char *buffer, char x, char y)* – Funkce bez návratové hodnoty. Funkce tiskne na displej pole znaků, na které ukazuje parametr funkce **buffer*. Parametry *x* a *y* je nastavována pozice na displeji, na kterou má být zobrazen první

znak řetězce.

- `void delay_us(unsigned int delay)` – Funkce bez návratové hodnoty. Tato funkce má za úkol pozdržet program na dobu v řádu μ s. Délka zpoždění je nastavena parametrem funkce `delay`.
- `void delay_ms(unsigned int delay)` – Funkce bez návratové hodnoty. Tato funkce má za úkol pozdržet program na dobu v řádu ms. Délka zpoždění je nastavena parametrem funkce `delay`.

3.3.2 Komunikace se senzory

Po inicializaci I²C komunikace funkcí `i2c_device_init()`, je dalším krokem nastavení řídicích registrů pro správnou činnost senzorů. Tato operace je prováděna ve funkci `i2c_setSlaveRegister()`. Grafické znázornění této operace je znázorněno na obr. 3.15.

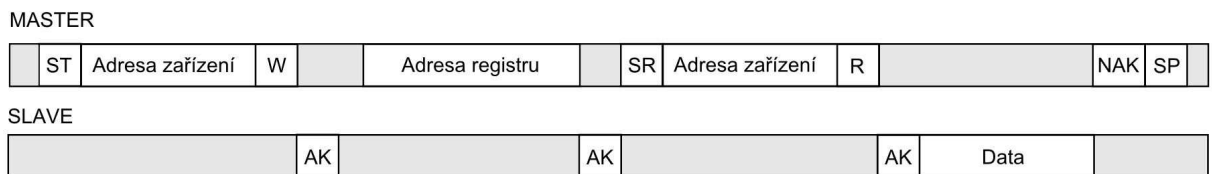


Obr. 3.15: Časový diagram zápisu do zařízení typu slave

Ještě před samotným vysláním dat je nutné sdělit zařízení typu master s kterým zařízením typu slave bude komunikovat. To se děje uložení 7-bitové adresy cílového zařízení typu slave do patřičného registru v zařízení typu master. V případě, že se po sběrnici nepřenáší žádná data, na sběrnici je klidový stav, na obou vodičích je vysoká úroveň H. Komunikaci zahajuje a ukončuje vždy master. Začátek komunikace signalizuje tzv. *startovací podmínka* (ST). ST je kombinace doběžných hran, při které se změní úroveň signálu na obou vodičích z H do L a to nejdříve na SDA a následně na SCL. Konec zprávy je signalizován kombinací náběžných hran tzv. *stop podmínkou* (SP), což je inverzní funkce ST, čili změna úrovně z L do H v pořadí nejdříve na SCL a pak na SDA. Tyto dvě specifické kombinace se při přenosu vyskytují pouze na začátku a na konci zprávy. Bezprostředně za ST je vyslán první byte zprávy, který obsahuje 7-bitovou adresu slave zařízení a poslední bit (LSB) signalizuje, chce-li master zapisovat do slave (W - LSB bit je logická 0) nebo číst ze slave (R - LSB bit je logická 1). Po vyslání posledního bitu nastaví master na SCL stav H a čeká na *potvrzovací bit* (AK - acknowledge) od slave. Potvrzovací bit je signalizován stavem L. Tento stav na sběrnici vnutí slave zařízení, kterému se shoduje vyslaná adresa s vlastní adresou. AK též signalizuje, že byl zařízením přijat celý vyslaný byte. Další vyslaný byte obsahuje adresu

registru, do kterého chce master zapisovat. Po dalším přijatém AK je zařízením master vyslán byte, který nese informaci o tom, na jakou hodnotu se má registr nastavit. Po potvrzení přijatých dat, je vyslán SP.

Před čtením dat ze zařízení typu slave je nutné stejně jako u zápisu dat nejprve nastavit adresu cílového slave zařízení. Čtení je realizováno funkcí `i2c_singleRecivedData()`. Grafické znázornění čtení jednoho bytu je znázorněno na obr. 3.16.



Obr. 3.16: Časový diagram čtení jednoho bytu ze zařízení typu slave

Čtení začíná opět *startovací podmínkou*. Poté je vyslána adresa cílového slave zařízení s LSB bitem nastaveným do log. 0 pro režim zápisu. Po potvrzení přijatých dat je vyslána adresa registru, ze kterého chce master číst. Po potvrzení přijetí adresy registru bitem AK nejsou vyslána další data, ale je vyslán *opakovaný start* (SR – Start Repeated) a znovu adresa zařízení, ale tentokrát má LSB bit hodnotu logická 1 pro režim čtení. Slave po přijetí celého bytu vnutí na sběrnici AK a následně odvysílá obsah registru, o který byl zařízením typu master požádán. Master nevyšle potvrzovací bit (NAK – no acknowledge), ale stop podmínku (SP).

Takto je realizováno čtení pouze jednoho bytu, tzv. Single Byte Read, nicméně je ještě jedna možnost čtení a to čtení více bytů najednou, tzv. Multiple Byte Read nebo též nazýváno burst-read. Po vyslání dat od zařízení slave, vyšle master AK, automaticky je inkrementována požadovaná adresa registru a následně je odvysílán jeho obsah. Tato kombinace se opakuje do té doby, dokud master místo AK vyšle SP. Této metody není v programu využíváno, je zde pouze zmíněna jako alternativní možnost čtení registrů.

3.3.3 Komunikace s LCD displejem

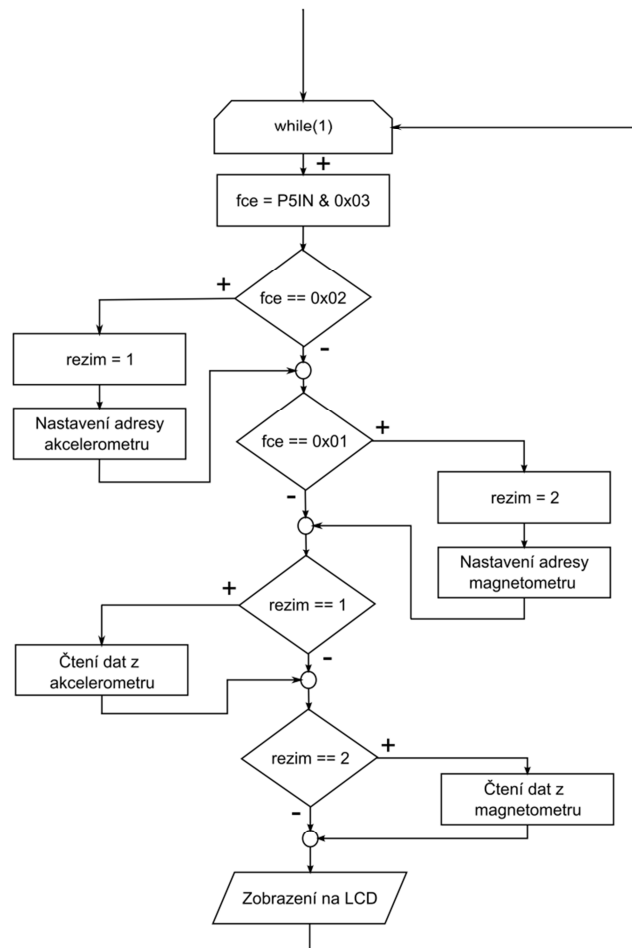
Prvním krokem komunikace s displejem je inicializace SPI rozhraní. Inicializace se provede zavoláním funkce `SPI_device_init()`. Poté je nutné nastavit správné počáteční hodnoty v řadiči displeje. To se provede zavoláním funkce `LCD_initDisplay()`.

Instrukční formát je rozdělen do dvou módů Data a Command (D/C). Je-li signál D/C nastaven do nízké úrovně L, tak vyslaný byte nese příkaz pro řadič. Je-li signál nastaven do vysoké úrovně H bude následující byte uložen do datové paměti RAM řadiče. Po každém

datovém bytu je automaticky inkrementován adresový čítač, takže každý následující byte je uložen na adrese o jedna větší než předešlý datový byte. Úroveň signálu D/C je čtena během přenosu minulého datového bytu.

3.3.4 Režim akcelerometru/magnetometru

Výběr režimu akcelerometru nebo magnetometru probíhá na základě testování globální proměnné *rezim*. Je-li zmáčknuto tlačítko S1, je uložena do této proměnné hodnota 1. Je-li zmáčknuto tlačítko S2, je do proměnné *rezim* uložena hodnota 2. Proměnná *fce* je lokální proměnná funkce *main()* a je do ní ukládán při každém průchodu nekonečné smyčky aktuální stav na bráně P5, což znamená aktuální stav tlačítek.



Obr. 3.17: Vývojový diagram výběru režimu

V případě, že je vybrán režim akcelerometru, tak v bloku [Čtení dat z akcelerometru] jsou za sebou volány funkce *readXakcel()*, *readYakcel()* a *readZakcel()*. V případě, že je vybrán režim magnetometru, jsou v bloku [Čtení dat z magnetometru] volány funkce

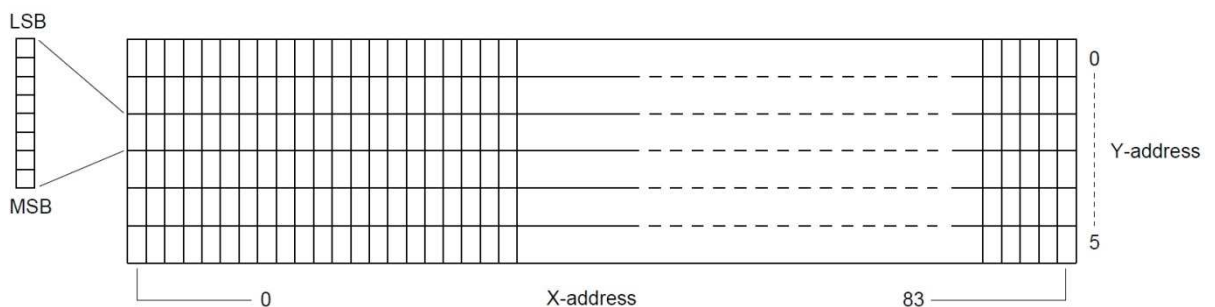
readXmag(), *readYmag()* a *readZmag()*.

V bloku [Zobrazení na LCD] jsou nejprve pomocí řetězcové funkce *sprintf()* převedeny číselné hodnoty dat z jednotlivých os čidel na řetězec a následně je tento řetězec funkcí *LCD_print()* zobrazen na displej.

Ve funkci *LCD_print()* je nejdříve nastaven kurzor do pozice zadávané parametry funkce *x* a *y*. Toto nastavení kurzoru zprostředkovává funkce *LCD_xy()*. Následně je ve for cyklu volána funkce *LCD_print_char()*. Cyklus for je cyklus s daným počtem opakování. Počet opakování je dán délkou řetězce neboli počtem znaků, které mají být zobrazeny na displej. Délka řetězce se získává řetězcovou funkcí *strlen()*. Princip zobrazování jednoho znaku bude rozebrán v následující podkapitole.

Zobrazení jednoho znaku na LCD displej

Adresace RAM paměť uvnitř řadiče LCD displeje je znázorněna na obr. 3.18. Celý displej je rozdělen do 6 řádek a 84 sloupců. Jeden sloupec má šířku jednoho pixelu na displeji a jeden pixel má velikost jednoho bitu v paměti. Každý řádek má na výšku osm bitů. Horní bit je LSB, dolní bit je MSB.



Obr. 3.18: Adresace RAM paměti řadiče LCD displeje [Převzato z [8]]

Má-li být zobrazen jeden bod na displeji, musí mít bit na stejném místě v paměti hodnotu 1. Například má-li být zobrazen bod v levém horním rohu, musí být v paměti na adrese (0,0) uložena hodnota 0x01. V případě zobrazení celého znaku, musí být znak vytvořen bod po bodu, neboli bit po bitu.

Takto vytvořené znaky jsou uloženy v programu v jednorozměrném poli datového typu `unsigned char` a názvem `ASCII_table`. Znaky jsou vytvořeny v pořadí podle ascii tabulky. Každý znak v tomto poli zabírá pět bytů. Ale ne každý znak využívá všech pěti bytů. Například číslice 1 v poli zabírá pouze tři prostřední byty. První a poslední byte má hodnotu 0. Kdyby mělo být zobrazováno na displej vždy celých pět bytů, výsledný text by nepůsobil pěkným vizuálním dojmem. Na tento problém je ve funkci *LCD_print_char()* pamatováno.


```

void LCD_print_char(char value)
{
    unsigned char i;
    unsigned short addr=0;
    unsigned short width=0;

    if(value>=32 && value<128)
    {
        // tisknutelny znak
        addr=value-32;
        addr=addr*5;
    }
    else{
        // netisknutelny znak
        return;
    }

    if(ASCII_table[addr] == 0x00){
        // uzky znak
        addr++;
        width = 3;
    }else{
        width = 5;
    }

    for(i=0; i<width; i++){
        // tisk znaku
        value=ASCII_table[addr+i];
        LCD_send(value, 1);
    }

    LCD_send(0, 1);
    // mezera 1 pixel mezi znaky

    return;
}

```

Uvnitř funkce *LCD_print_char()* je nejdříve testováno, zdali zadaný znak v parametru funkce *value* je tisknutelný znak nebo netisknutelný znak (obsah ascii tabulky od hodnot 0 až 31 v desítkové soustavě). Jedná-li se o netisknutelný znak, tak je funkce ukončena. Jedná-li se o tisknutelný znak, je od proměnné *value* odečtena hodnota 32 (v proměnné *value* je uložena hodnota pozice znaku v ascii tabulce a odečtením hodnoty 32 posuneme nulový bod ascii tabulky do pozice prvního tisknutelného znaku, takže nám poté koresponduje začátek ascii tabulky se začátkem pole *ASCII_table*) a výsledek je uložen do proměnné *addr*. Poté již stačí vynásobit *addr* hodnotou 5 a dostaneme se na pozici prvního bytu požadovaného znaku.

V následující části funkce je řešen problém s úzkými znaky. Je-li hodnota prvního bytu znaku (uloženého v poli *ASCII_table*) nulová, pak se jedná o úzký znak a je mu přiřazena proměnnou *width* délka tři byty a při tisku znaku budou zobrazeny jen prostřední tři byty. Je-li hodnota nenulová, délka znaku je pět bytů. Poté se v cyklu *for* posílají funkcí *LCD_send()* informaci řadiči LCD displeje o tom, jaké pixely mají být rozsvíceny. V závěru funkce jsou vyslána data s nulovou hodnotou, tudíž se jedná o mezeru o šířce jednoho pixelu.

4 Závěr

Práce podává informace o vhodných senzorech pro určování náklonu a orientace v prostoru. Je realizován modul Position Sensing Board pro určení náklonu a orientace v prostoru. Pro tento modul byly vybrány vhodné technické prostředky. Modul získává naměřená data ze senzorů přes sériovou sběrnici I²C, zpracovává je a posílá je přes SPI rozhraní na LCD displej. Funkčnost modulu je v práci detailně popsána.

Přesnost měřených veličin je závislá na zvoleném rozsahu měřících součástek. U magnetometru je přesnost měření ještě závislá na správném nastavení hard-iron offsetu. Tento offset je nastavován v závislosti na prostředí, ve kterém je zařízení používáno. V programu zatím není využíváno možnosti komunikace s počítačem přes USB rozhraní.

Navržené zařízení by bylo možné použít například jako elektronický kompas. Samostatným magnetometrem je možné přesně určovat severní pól geomagnetického pole pouze v případě, že bude zařízení položeno na vodorovné podložce a nebude nakláněno. Jelikož je ale zařízení osazeno i akcelerometrem, je možné případný náklon měřit a pomocí určitých rovnic přepočítávat výstupní data z magnetometru tak, aby bylo ukazováno na severní geomagnetický pól i v případě, že je zařízení například drženo v ruce, kde není zajištěna vodorovná pozice zařízení se zemí.

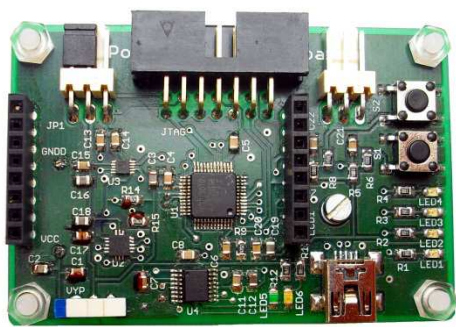
Uvedené využití není jediné možné. Vzhledem k tomu, že je z mikrokontroléru vyveden ještě druhý UART, lze jej například využít k propojení s dalším zařízením, které může být řízeno náklonem nebo magnetickým polem.

Literatura

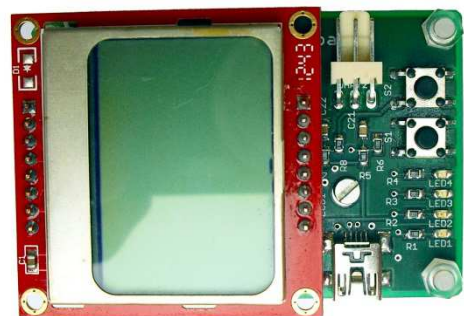
- [1] Řipka, Ďaso, Kreidl, Novák. *Senzory a převodníky*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-01-03123-3
- [2] Husák. Přednáška *Akcelometry*. ČVUT FEL Praha. Dostupné z:
<http://www.micro.field.cvut.cz/>
- [3] Internetové stránky <http://automatizace.hw.cz/> - seriál *Principy akcelerometrů, AMR, GMR, TMR*.
- [4] *Datasheet MSP430F5510*. Firemní literatura firmy Texas Instruments.
- [5] *Datasheet LIS331HH*. Firemní literatura firmy STMICROELECTRONICS.
- [6] *Datasheet MAG3110FCR1*. Firemní literatura firmy Freescale Semiconductor.
- [7] *Datasheet FT230X USB TO BASIC UART IC version 1.2*. Firemní literatura firmy FTDI Chip.
- [8] *Datasheet PCD8544 48 x 84 pixels matrix LCD controller/driver*. Firemní literature firmy Philips Semiconductors
- [9] *MSP430x5xx/MSP430x6xx Family User's Guide*. Firemní literatura firmy Texas Instruments.
- [10] Bochníček, Hejda. *Magnetické pole Země a kosmické počasí*. Geofyzikální ústav AV ČR. http://www.ig.cas.cz/userdata/files/popular/Magneticke_pole.pdf

Přílohy

Příloha A Fotografie zařízení



Obr. A.1: Horní pohled bez LCD displeje

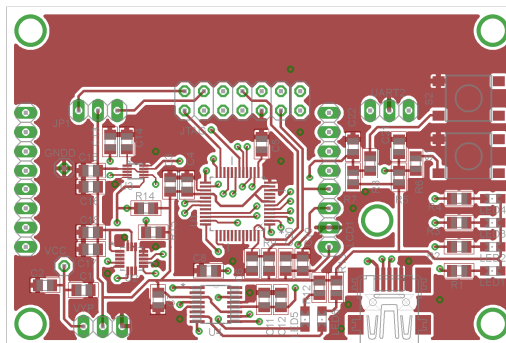


Obr. A.2: Horní pohled

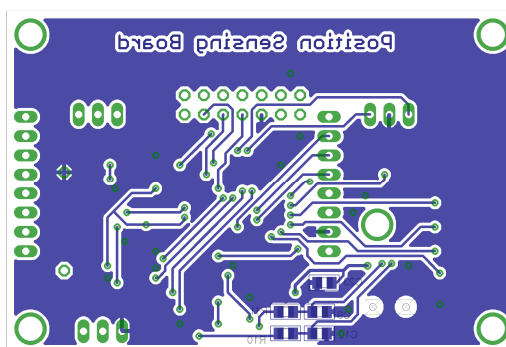


Obr. A.3: Spodní pohled

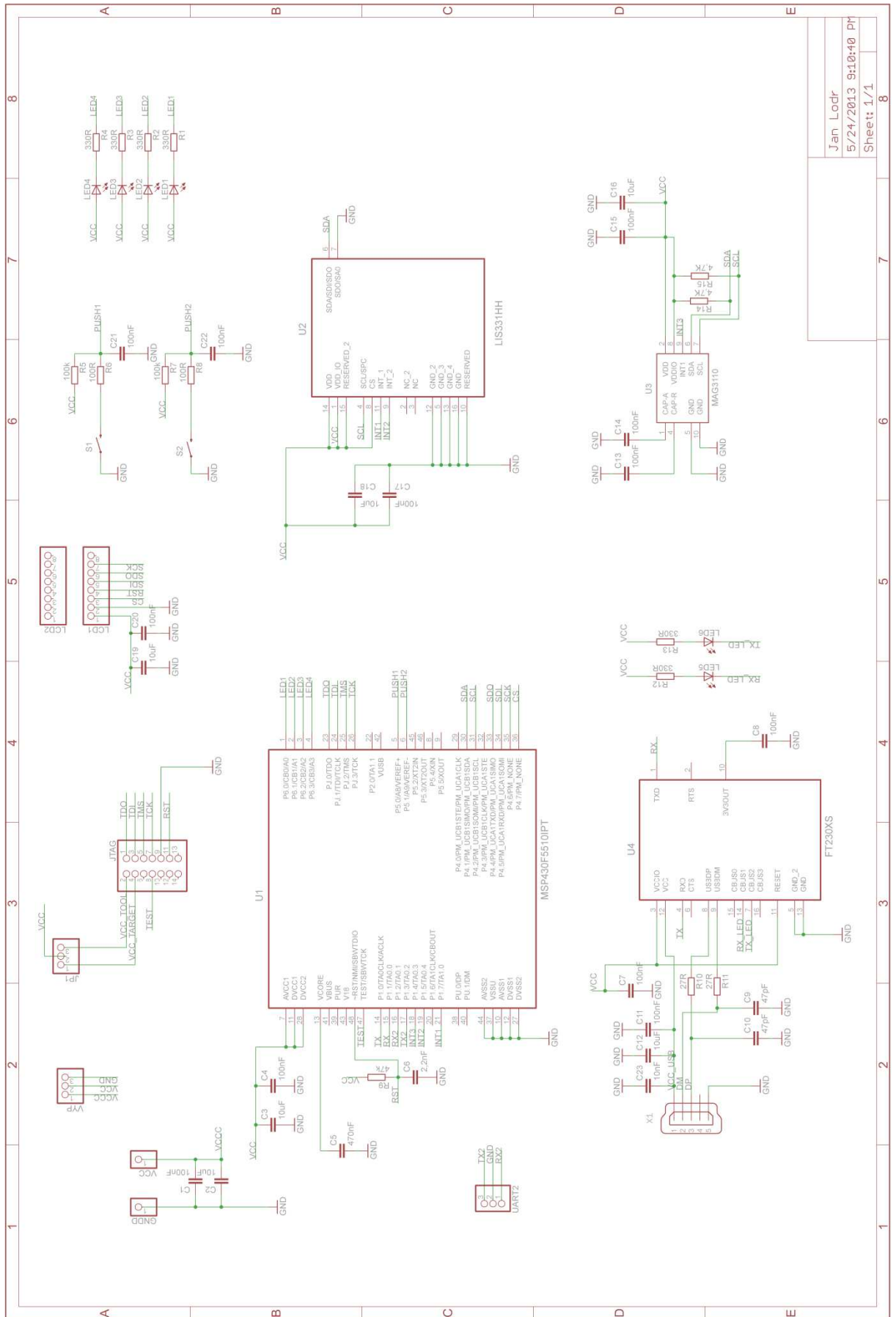
Příloha B Deska plošného spoje, schéma, seznam součástek



Obr. B.1: Horní vrstva. Rozměry: 67,5 x 45,2 mm



Obr. B.2: Spodní vrstva



Obr. B.3: Schéma zapojení

Qty	Hodnota	Název	Označení součástky
5		LEDCHIPLED_0805	LED1, LED2, LED3, LED4, LED5, LED6
2		PINHD-1X1	GNDD, VCC
3		PINHD-1X3	JP1, UART2, VYP
2		PINHD-1X8	LCD1, LCD2
1		PINHD-2X7	JTAG
1	2,2 nF	C-EUC0805	C6
2	4,7 k Ω	R-EU_R0805	R14, R15
1	10 nF	C-EUC0805	C23
6	10 μ F	C-EUC0805	C2, C3, C12, C16, C18, C19
2	27 Ω	R-EU_R0805	R10, R11
1	47 k Ω	R-EU_R0805	R9
2	47 pF	C-EUC0805	C9, C10
2	100 Ω	R-EU_R0805	R6, R8
2	100 k Ω	R-EU_R0805	R5, R7
12	100 nF	C-EUC0805	C1, C4, C7, C8, C11, C13, C14, C15, C17, C20, C21, C22
6	330 Ω	R-EU_R0805	R1, R2, R3, R4, R12, R13
1	470 nF	C-EUC0805	C5
1		FT230XS	U4
1		LIS331HH	U2
1		MAG3110	U3
1		MINI-USB-32005-	X1
1		MSP430F5510IPT	U1
2		SWITCH-	S1, S2

Tab. B.1: Seznam součástek