

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

DETEKCE POHYBU POMOCÍ INERCIÁLNÍCH SENZORŮ

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

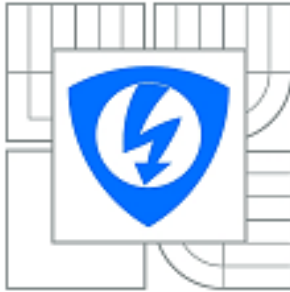
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. FRANTIŠEK ŠTANCL

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

DETEKCE POHYBU POMOCÍ INERCIÁLNÍCH SENZORŮ

MOTION DETECTION BASED ON AN ACCELEROMETER MEASUREMENT

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. FRANTIŠEK ŠTANCL

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. TAMÁS PÁL

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Telekomunikační a informační technika

Student: Bc. František Štandl
Ročník: 2

ID: 17726
Akademický rok: 2014/2015

NÁZEV TÉMATU:

Detekce pohybu pomocí inerciálních senzorů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Student v práci prostuduje možnosti detekce pohybu pomocí nejnovějších MEMS akcelerometrů. Cílem práce je návrh a implementace zařízení pro indikaci události pohybu s důrazem na optimalizaci spotřeby. Student vybere vhodný akcelerometr, navrhne desku plošného spoje pro připojení k nízko-příkonovému mikrokontroléru EFM32 a implementuje obslužný software. Na závěr student detailně analyzuje spotřebu a přesnost navrženého řešení.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] WARWICK A., Smith. C Programming for Embedded Microcontrollers. Nederland: Elektor Publishing, 2009, 319 s. ISBN 978-0905705804.

[2] BEEBY, Stephen, Graham ENSEL a Michael KRAFT. MEMS mechanical sensors. Boston: Artech House, 2004, 269 s. ISBN 15-805-3536-4.

Termín zadání: 9.2.2015

Termín odevzdání: 26.5.2015

Vedoucí práce: Ing. Tamás Pál

Konzultanti diplomové práce:

doc. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Předložená diplomová práce se věnuje problematice detekce pohybu, zaměřené na spotřebu energie. V jejím úvodu je kladen důraz na možnosti měření zrychlení a analyzuje technologii MEMS u akcelerometrů. Hlavním cílem práce je vybrat vhodné komponenty a pomocí nich také sestavit nízko-příkonový modul. V textu jsou rovněž uvedené návrhy řešení daného problému. Součástí práce je i konstrukce modulu, návrh plošného spoje a softwarového vybavení. Závěrem jsou shrnuté dosažené výsledky a přesnost řešení.

KLÍČOVÁ SLOVA

Akcelerometr, nízko-příkonový mikroprocesor EFM32, embedded systémy, jazyk C, detekce pohybu, optimalizace spotřeby, Simplicity, Silicon labs, MEMS

ABSTRACT

This thesis is devoted to detect motion and it is focused on energy consumption. The introduction involves possible ways for acceleration measuring and discusses The MEMS technology in accelerometers. It also describes components used in a low-power module and some suggestions leading to resolution of this issue. This thesis includes the module design as well, PCB design and software equipment. Finally, it evaluates the results and the solution accuracy.

KEYWORDS

Accelerometer, low-power microprocessor EFM32, embedded systems, programming language C, motion detection, optimization of consumption, Simplicity, Silicon Labs, MEMS

ŠTANCL, F. *Detekce pohybu pomocí inerciálních senzorů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 48s 15s příloh. Vedoucí diplomové práce Ing. Tamás Pál.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Detekce pohybu pomocí inerciálních senzorů jsem 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 diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Tamásovi Pálovi, za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

Výzkum popsáný v této diplomové práci byl realizován v laboratořích podpořených projektem Centrum senzorických, informačních a komunikačních systémů (SIX); registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace.

OBSAH

1	ÚVOD	13
2	Detekce Pohybu	14
2.1	Principy detekce	14
2.1.1	Princip senzoru kapacitního	15
2.1.2	Piezoelektrické akcelerometry	15
2.2	Rozdělení akcelerometrů podle použití a typu měření	17
2.2.1	Rozdíl mezi gyroskopem a akcelerometrem	17
2.3	Použití akcelerometru	18
2.4	Mikro-elektro-mechanické systémy (<i>MEMS</i>)	18
2.5	Akcelerometr ADXL343 (<i>Analog Devices</i>)	21
2.6	Akcelerometr KX022 (<i>Kionix</i>)	21
2.7	Snížení spotřeby procesoru EFM32	22
2.7.1	Snížení statického proudu	22
2.7.2	Snížení dynamického proudu	23
3	Návrh řešení sensorového modulu	25
3.1	Základní bloky sensorového modulu	25
3.2	Výběr vhodných komponent	26
3.2.1	Nízkopříkonový mikroprocesor rodiny EFM32	26
3.2.2	Akcelerometr MMA8451Q (<i>Freescale</i>)	26
3.2.3	Vývojový modul	32
3.3	Přenos dat	33
3.3.1	I ² C komunikace	33
3.3.2	Převodník USB - sériový port	36

3.4	Napájení	38
3.4.1	Baterie	38
3.5	Programové vybavení	38
3.5.1	Programovací prostředí <i>Simplicity Studio</i>	38
3.5.2	SW pro návrh plošných (<i>EAGLE</i>).....	39
4	Dosažené výsledky	41
4.1	Firmware pro procesor EFM32G22F128.....	41
4.2	Demo režim senzorového modulu	43
4.3	Komunikace s modulem pomocí konzole.....	45
4.3.1	Mód1 x-y-z delta mode	46
4.3.2	Mód2 - detekce pohybu (<i>Motion mode</i>).....	47
4.3.3	Mód3 - volný pád (<i>Freefall mode</i>).....	47
4.3.4	Mód4 - dynamický pohyb (<i>Transient HPF</i>)	47
4.3.5	Mód5 - náklon (<i>Landscape</i>).....	47
4.4	Senzorový Modul.....	48
4.5	Návrh a výroba desky plošných spojů	48
4.6	Spotřeba senzorového modulu	48
4.6.1	Spotřeba podle druhu použití	50
4.6.2	Reálné měření senzorového modulu	52
5	ZÁVĚR.....	55
	POUŽITÁ LITERATURA	56
	SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK.....	58
	SEZNAM PŘÍLOH	62
A	NÁVRH ZAŘÍZENÍ	63
A.1	Obvodové zapojení	63
A.2	Deska plošného spoje – top (strana součástek).....	66

A.2	Deska plošného spoje – bottom (strana spojů)	66
C	FOTOGRAFIE	67
C.1	Fotografie měření.....	67
C.2	Fotografie přístrojů	69
D	SEZNAM SOUČÁSTEK	73
E	OBSAH PŘILOŽENÉHO CD	74

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2-1 Princip měření akcelerace pomocí kapacitního snímače	15
Obr. 2-2 Princip piezoelektrického akcelerometru.....	16
Obr. 2-3 Akcelerometr vyrobený pomocí technologie MEMS [5]	19
Obr. 2-4 Miniaturní zrcadlo ovládané pomocí motoru [5]	20
Obr. 2-5 Přehledový diagram oscilátorů rodiny EFM32 [9]	23
Obr. 3-1 Blokové diagram sensorového modulu.....	25
Obr. 3-2 Blokový diagram akcelerometru MMA8451Q [10]	27
Obr. 3-3 Operační režimy akcelerometru MMA8451 převzato z [10].....	28
Obr. 3-4 Poloha čipu MMA845x vůči Zemi [10].....	28
Obr. 3-5 Nastavení hranice vzniku přerušení (<i>threshold</i>) [10].....	29
Obr. 3-6 Blokový diagram vstupů a výstupů akcelerometru MMA8451 [10]	30
Obr. 3-7 Popis komponent modulu Wonder Gecko [11].....	33
Obr. 3-8 I2C zapojení Master a Slave [12].....	34
Obr. 3-9 Komunikace I2C mezi EFM332 a akcelerometrem MMA8451	35
Obr. 3-10 Blokový diagram převodníku CP2104 převzato z [13]	37
Obr. 4-1 Stavový diagram firmwaru sensorového modulu	42
Obr. 4-2 Spotřeba CPU v režimu DEMO	43
Obr. 4-3 Zobrazení poměru spotřeby v jednotlivých energetických módech celého modulu	44
Obr. 4-4 Výdrž baterie CR2032 216dní při režimu DEMO (500ms EM2, 80ms EM0)	44
Obr. 4-5 Ukázka MENU sensorového modulu v konzoli	45
Obr. 4-6 Výpis konzole sensorového modulu po připojení na USB	46
Obr. 4-7 Připojení DEBUG konektoru vývojového modulu k vyvíjené aplikaci	52
Obr. 4-8 Zvýšená spotřeba procesoru EFM32 zkreslená vlivem zapojení DEBUG konektoru 16-17 μ A, (označená zeleně)	53

Obr. 4-9	Varianta C, ODR MMA8451 aktivní režim, ODR 12,5Hz, perioda 80ms, CPU čte data interval 1s, jinak EM2, spotřeba modulu změřená pomocí <i>Energy Profiler</i>	54
Obr. 4-10	Varianta D, MMA8451 aktivní režim, ODR 12,5Hz, perioda 80ms, CPU v EM2, spotřeba modulu změřená pomocí <i>Energy Profiler</i>	54
Obr. 0-1	Schéma zapojení sensorového modulu (CPU, JTAG Debug konektor).....	63
Obr. 0-2	Schéma zapojení sensorového modulu (Expand konektor, krystaly, GPIO).....	63
Obr. 0-3	Schéma zapojení sensorového modulu (výstupy CPU EFM32G222F128).....	64
Obr. 0-4	Schéma zapojení sensorového modulu (MMA8451Q, baterie, rozšiřující konektory).....	65
Obr. 0-5	Schéma zapojení USB převodníku CP2104.....	65
Obr. 0-6	Rozměr desky 33 x 44 [mm], měřítko M2:1.....	66
Obr. 0-7	Rozměr desky 33 x 44 [mm], měřítko M2:1.....	66
Obr. 0-8	Měření průměrné spotřeby energie sensorového modulu pomocí měřícího přístroje METEX měření varianty D.....	67
Obr. 0-9	Zobrazení varianty A a varianty C v programu eABattery.....	67
Obr. 0-10	Zobrazení komunikace I ² C v programu <i>Bitscope</i>	68
Obr. 0-11	Senzorový modul – strana součástek.....	69
Obr. 0-12	Senzorový modul – strana baterie.....	69
Obr. 0-13	Prototyp akcelerometru MMA8451Q na univerzální DPS.....	70
Obr. 0-14	Vývojový modul WONDER GECKO.....	70
Obr. 0-15	Připravený akcelerometr MMA8451 před montáží na DPS,.....	71
Obr. 0-16	DPS sensorové desky před osazením akcelerometru MMA8451.....	71
Obr. 0-17	Pohled na testovací sestavu.....	72

SEZNAM TABULEK

Tab. 3-1 Porovnání akcelerometru MMA8451 a KX022	31
Tab. 3-2 Spotřeba MMA8451 vs KX022	31
Tab. 3-3 Porovnání funkcí akcelerometrů MMA8451Q a KX022	32
Tab. 4-1 Celková spotřeba sensorového modulu v závislosti na použitém režimu a četnosti čtení dat z akcelerometru (při HFRCO 1MHz, délka měření vzorku 80ms)	50
Tab. 4-2 Praktické měření průměrné spotřeby energie hotového sensorového modulu	53

1 ÚVOD

V dnešní době jsou mikroprocesory součástí každodenního života. Běžný uživatel se s nimi setkává v každém chytrém telefonu, tabletu, v běžné elektronice. Čím dál větší nároky jsou kladeny na úspory elektrické energie a to se mikroprocesorů velmi týká. Se spotřebou energie je i spojena technologie společné integrace mechanických a elektronických struktur, označovaná jako MEMS. Ta se stále častěji vyskytuje uvnitř integrovaných obvodů a zařízení automobilového a leteckého průmyslu. Dnes se již vyskytují i v běžných přístrojích domácí potřeby a využíváme je, aniž o tom často tušíme. Velmi populární v posledních letech se staly akcelerometry, které jsou konstruovány k měření polohy a vibrací, nebo detekce pohybu a zrychlení.

Cílem diplomové práce je implementace zařízení, které indikuje událost pohybu s ohledem na spotřebu energie. Této vlastnosti lze využít v aplikacích napájených bateriemi s důrazem na její dlouhou výdrž. Požadujeme u nich zpracování dat z akcelerometru, čidla, které mění fyzikální veličinu zrychlení na elektrický signál. Ten po digitalizaci zpracováváme pomocí mikroprocesoru.

Součástí projektu je modul s programovým vybavením, který po připojení k osobnímu počítači lze ovládat a zpracovávat naměřené údaje. Modul pracuje i samostatně pomocí vestavěné baterie a indikuje akceleraci, pohyb. Aplikace pro mikroprocesor je napsána v jazyce C a umožňuje jednoduše modul ovládat. Důraz je kladený na energetickou nenáročnost, ovšem uplatnilo se i univerzálnosti a jednoduchosti výsledného systému.

2 Detekce Pohybu

Detekce pohybu se provádí pomocí detektorů zrychlení neboli akcelerometry, které přeměňují zrychlení na měřitelný elektrický signál. Akcelerometry, senzory pro měření statického nebo dynamického zrychlení, jsou vhodné nejen pro měření odstředivých a setrvačných sil, ale i pro určování pozice tělesa, jeho naklonění nebo vibrací.

Rozlišujeme dva základní druhy zrychlení:

- Statické zrychlení, resp. sílu vzniklou působením gravitace (přitažlivostí) Země.
- Dynamické zrychlení (akcelerace), resp. sílu vzniklou změnou rychlosti pohybujícího se předmětu resp. senzoru

Mezi měření dynamického zrychlení patří i detekce vibrací, statické zrychlení je již ze svého principu neustále přítomné a je tedy ho nutné při měření dynamického zrychlení ve výsledcích odstranit filtrací. Dnešní integrované senzory obvykle poskytují obě možnosti měření v rámci jednoho integrovaného obvodu. Ten zároveň obsahuje snímací prvek (čidlo) a vyhodnocovací obvody.

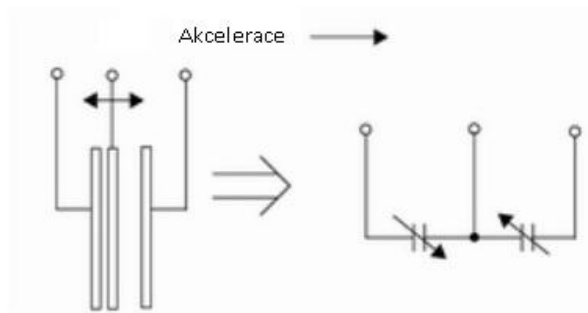
2.1 Principy detekce

U akcelerometrů se využívá třech základních principů:

- Akcelerometry s proměnnou kapacitou (VC) – používá mikrokřemíkovou mechanickou strukturu, kde zrychlení odpovídá změně kapacity
- Piezoelektrické akcelerometry (PE) - využívají piezoelektrický krystal (přírodní nebo keramiku), který generuje náboj úměrný působící síle, která při zrychlení působí na každý objekt
- Piezoresistivní akcelerometry (PR) - využívá mikrokřemíkovou mechanickou strukturu, kde zrychlení odpovídá změně odporu

2.1.1 Princip senzoru kapacitního

Princip měření je založen na změně kapacity vnitřního proměnného integrovaného kondenzátoru vlivem působící síly vzniklé zrychlením celého senzoru. Na Obr. 2-1 je znázorněn princip měření akcelerace. Samotné čidlo je vlastně povrchová mikromechanická polykřemíková struktura, obsahující nosník, pružiny, pevné úchyty vytvořené na povrchu křemíkového monokrystalu.



Obr. 2-1 Princip měření akcelerace pomocí kapacitního snímače

Křemíkové pružiny umožňují pohyb celé mechanické struktury po povrchu monokrystalu a zároveň poskytují mechanický odpor síle vzniklé zrychlením. Struktura senzoru umožňuje měřit kladná i záporná statická i dynamická zrychlení.

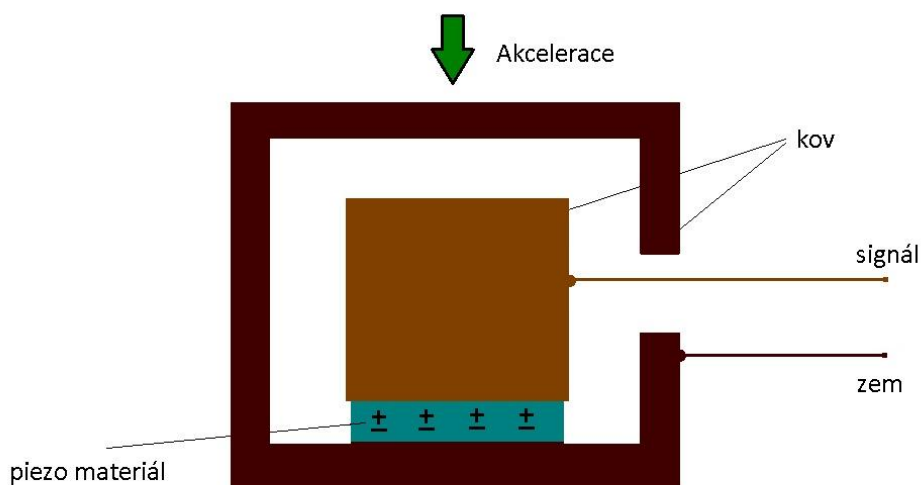
2.1.2 Piezoelektrické akcelerometry

Za použití piezoelektrický materiálu, který generuje náboj úměrný mechanickému namáhání vzniklé působící akcelerací měření náboje piezokrystalu probíhá buď přímo pomocí externí elektroniky, nebo častěji vnitřní elektronika senzoru konvertuje náboj na napěťový výstup s nízkou impedancí, jednoduchá konstrukce umožňuje senzor napojit na jednoduchý vyhodnocovací obvod. Tyto senzory nelze použít při měření konstantního zrychlení tj. frekvencí nižších než 0,5 Hz [1].

Základ piezoelektrických akcelerometrů je tvořen dvěma částmi:

- Piezoelektrický materiál - snímač měřící zrychlení
- Seismická hmota - převádí dle Newtonova zákona hodnotu zrychlení na sílu ($F=m.a$)

Fyzikální princip je znázorněn na Obr. 2-2. Jedna strana piezoelektrického materiálu (snímač, resp. převodník zrychlení) je upevněn na tuhou podpěru základny senzoru. Část pojmenovaná jako seismická hmota je připevněna na piezosnímač (případně také k druhé straně pouzdra).



Obr. 2-2 Princip piezoelektrického akcelerometru

Jestliže je akcelerometr vystaven zrychlení a (vibracím, akceleraci, otřesům), generovaná síla F , která působí na piezoelektrický element, způsobí vygenerování náboje, resp. napětí na výstupu senzoru. Podle Newtonova zákona je tato síla úměrná zdroji zrychlení a seismické hmotě. Piezoelektrický efekt tak generuje na výstupu náboj q úměrný působící síle. [1]

Protože seismická hmota má konstantní hmotnost, výstupní signál v podobě náboje je úměrný akceleraci senzoru. Pokud je akcelerometr pevně upevněn k testovanému objektu, měří i jeho zrychlení (zrychlení celé soustavy).

Akcelerometr charakterizuje nábojová citlivost (*charge sensitivity*) B_{qa} , resp. napěťová citlivost (*voltage sensitivity*) B_{ua} . [2]

2.2 Rozdělení akcelerometrů podle použití a typu měření

Akcelerometry jsou využívány v mnoha vědeckých i průmyslových aplikacích jako údržba, letecká technika, automobilový průmysl, zdravotnictví, řízení procesů apod. Avšak pro různá měření, tj. pro měření klasického zrychlení, nárazů a vibrací využívají mírně odlišný princip funkce:

Seismické senzory - jsou vhodné pro seismické měření a měření vibrací v budovách. Vysoká citlivost je dosažena pomocí speciálního snímacího elementu a ne pouze vnitřní elektronikou což by způsobilo větší šum. Mohou tedy detekovat i velmi slabé chvění a otřesy. Obvykle využívají ohybovou konstrukci. [1]

Senzory otřesů a vibrací - jsou vhodné pro měření chvění pohyblivých konstrukcí strojů. Často potřebují velkou teplotní odolnost a pevné robustní provedení odolávající prašnému a vlhkému prostředí. Méně přesné akcelerometry jsou konstruovány v kompresním módu, ty přesnější ve smykovém.

Akcelerometry pro měření pohybu - měří pohyb a zrychlení objektu, ke kterému jsou připevněny. Piezoelektrické akcelerometry patří mezi senzory výrobně jednodušší konstrukce a vyrábějí se již delší dobu. I když na dnešní dobu nestálé miniaturizace a použitím integrovaných obvodů se výše popsané senzory zdají být trochu veliké, tak pro průmyslové aplikace, zvláště ve strojírenství a geologickém výzkumu jsou stále velmi vhodné a často využívané. [1]

2.2.1 Rozdíl mezi gyroskopem a akcelerometrem

Z pohledu základního principu jen jeden významný rozdíl. Pro oba senzory platí podobný princip - pohyblivý rám se snímacími ploškami pracující jako elektrody kondenzátorů pohyblivá struktura je u akcelerometru volná a hýbe se jen při působení síly (zrychlení) u gyroskopu je s touto strukturou záměrně periodicky pohybováno (mechanická rezonance), aby se projevil efekt Coriolisovy síly akcelerometr měří hodnotu vychýlení vnitřní MEMS struktury jako důsledek působícího zrychlení (síly vznikající při urychlování či zpomalování přímo pohybujícího se objektu) gyroskop zjišťuje rotační pohyb, přesněji řečeno rychlost ustáleného rotačního pohybu. [3]

2.3 Použití akcelerometru

Akcelerometry lze použít v mnoha aplikacích, jako například:

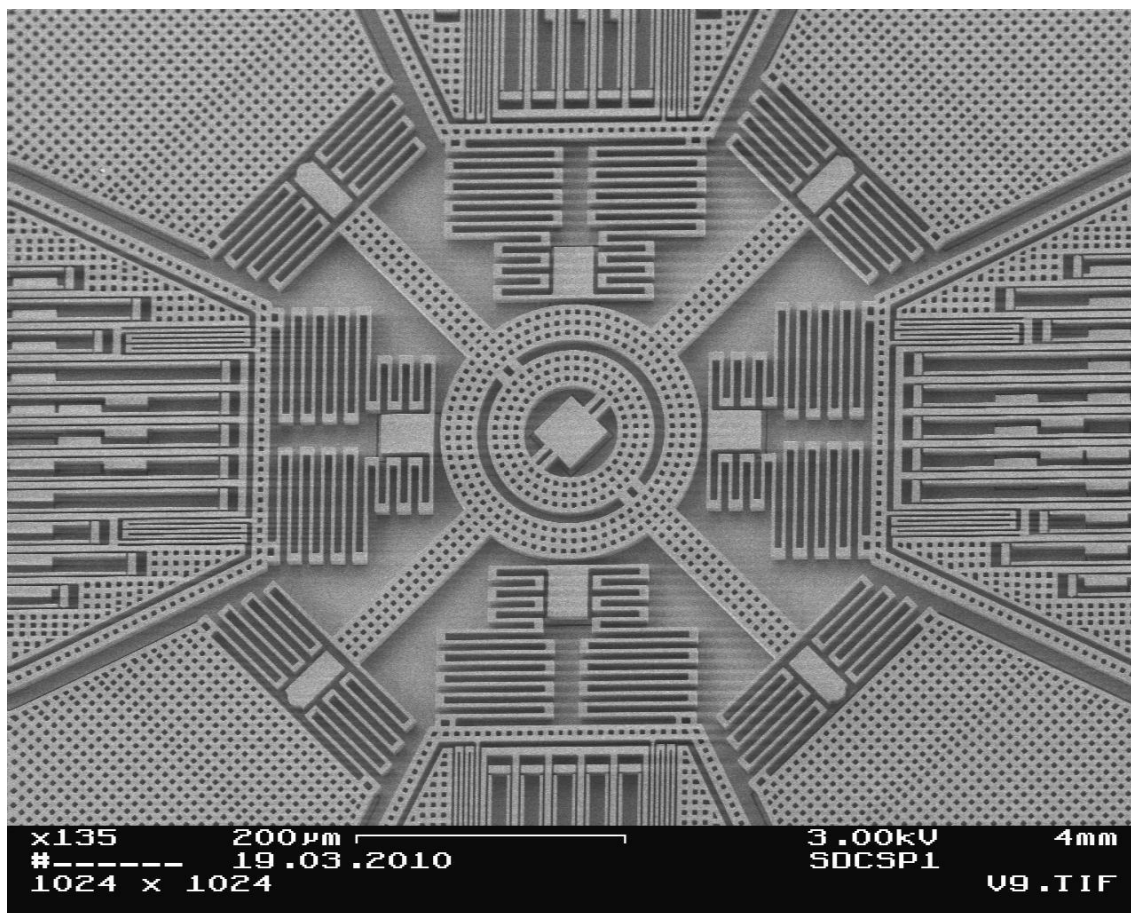
- Automobilový průmysl - senzory pro airbagy, zařízení pro řízení jízdní stability vozidla
- Měření vibrací, měření natočení a detekce otáčení
- Přesné měření náklonu s rychlou odezvou
- Měření a detekce pohybu a rychlosti
- Měření a detekce seismické aktivity
- Měření akcelerace, měření odstředivé síly a zrychlení
- Navigační systémy, ovládací prvky elektroniky, dálkové ovladače
- Zabezpečovací systémy vozidel

2.4 Mikro-elektro-mechanické systémy (MEMS)

MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) je označení samotné technologie i produktů, které jsou touto technologií vyráběny. Jedná se o umístění elektronických a mikro mechanických prvků na křemíkovou bázi. Tento postup pochází z výroby integrovaných obvodů. V souvislosti s MEMS se hovoří o tzv. inteligentních snímačích, protože produkt obsahuje jak mechanický tak i elektrický systém. Mechanický má za úkol převést fyzikální podmět na elektrickou veličinu a elektrický systém se stará o další zpracování, úpravu vytvořené veličiny (zesílení, filtraci atd.). Jako stěžejní produkty této technologie se považují především různé pohybové senzory jako akcelerometry a gyroskopy. Můžeme se setkat ale i např. s tlakovými senzory, mikročerpadly, mikropohony atd. [4]

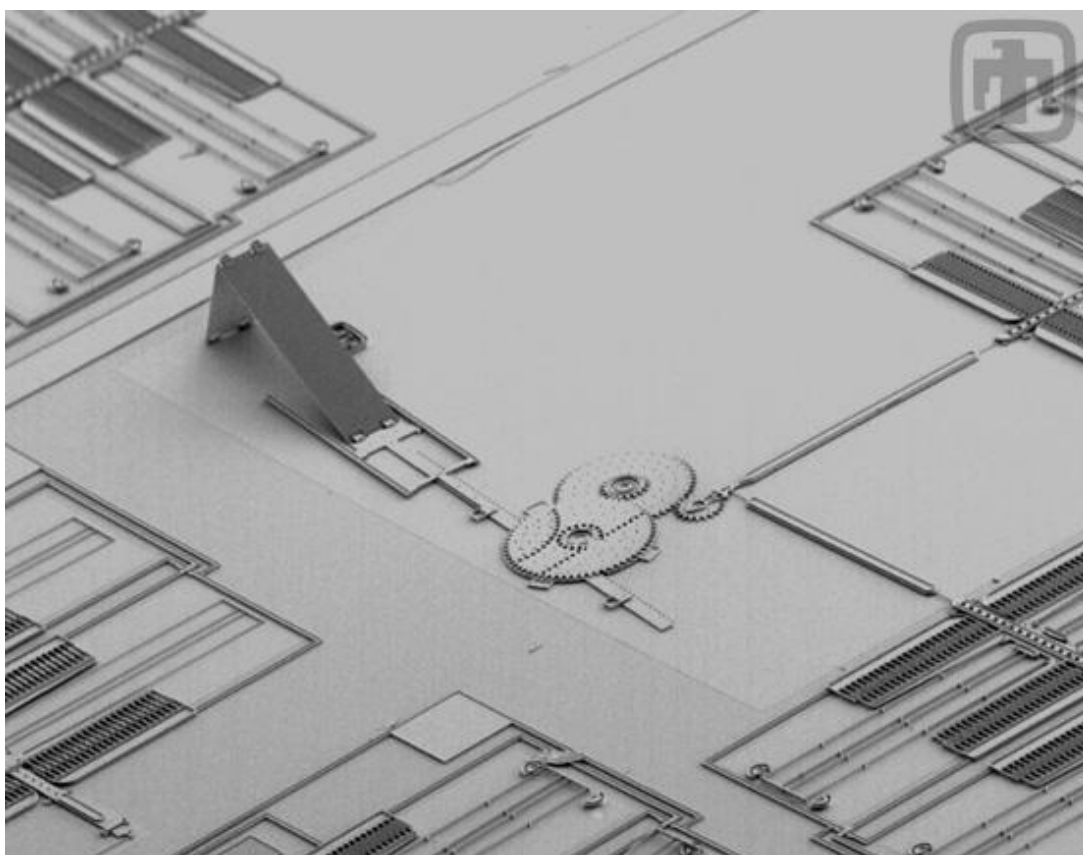
Zatímco elektronické části jsou vyráběny "tradičními" technologiemi typu CMOS, Bipolar nebo BiCMOS, mikromechanické části jsou zhotovovány prostřednictvím technologií různého selektivního leptání nebo implementováním nových/dalších vrstev. Budoucnost součástek MEMS spočívá v dosažení plně monolitické integrace MEMS s řídicí elektronikou a obvody pro zpracování signálu na substrátu CMOS, tzn. bez nutnosti přidávat/implantovat další vrstvy jiného složení. Plně monolitické řešení má své přednosti v miniaturizaci a zlevnění maximální výroby díky snížení počtu výrobních kroků.

Vzhledem k tomu, že MEMS zařízení jsou vytvořeny pomocí stejných postupů použitých k vytvoření integrovaného obvodu, v některých případech to je vlastně možné vyrobit mikro-stroj a mikro-elektroniku na stejném kusu křemíku. Zhotovení mechanismu společně s tranzistory vytváří stroje, které mohou mít určitou inteligenci.



Obr. 2-3 Akcelerometr vyrobený pomocí technologie MEMS [5]

Produkty MEMS vychází z možností MEMS technologie a jedná se především pohybové senzory (akcelerometry, gyroskopy...), ale i mikročerpadla, mikropohony, mikročívky aj. V souvislosti s těmito produkty se hovoří o systému na čipu nebo také o inteligentním snímači, jelikož je zde přítomen jak mechanický subsystém (nutný pro transformaci fyzikální podstaty na elektrickou veličinu), tak elektronický subsystém zajišťující následné zpracování (zesílení, saturace, filtrace aj.). [5]



Obr. 2-4 Miniaturní zrcadlo ovládané pomocí motoru [5]

Rozmezí fyzických rozměrů MEMS zařízení, se mohou pohybovat od jednoho mikronu až do několika milimetrů. Dále se MEMS zařízení mohou lišit od relativně jednoduchých konstrukcí, které nemají žádné pohyblivé prvky, na extrémně složité elektromechanické systémy s více pohyblivými prvky, kde kontrolu zabezpečuje integrovaná mikroelektronika. Jedním z hlavních kritérií MEMS je, že existují alespoň některé prvky, které mají nějaký druh mechanické funkce. Během posledních několika desetiletí bylo vyvinuto velký počet mikrosenzorů pro téměř každou veličinu včetně teploty, tlaku, setrvačné síly, chemických látek, magnetická pole, záření apod. Pozoruhodné je, že mnoho z těchto miniaturních senzorů prokázaly výkony přesahující ty jejich standardně vyráběné protějšky. [5]

2.5 Akcelerometr ADXL343 (*Analog Devices*)

ADXL343 je univerzální 3osý digitální MEMS. Volitelný rozsah měření a šířku pásma, konfigurovatelný s vestavěnou detekcí pohybu je vhodný pro snímání zrychlení v široké škále aplikací. Měří jak dynamické zrychlení vyplývající z pohybu i statické zrychlení. Odolnost 10.000 g šoku a široký rozsah teplot (-40 ° C až + 85 ° C) umožňují využití akcelerometru i v náročných podmínkách. Měření zrychlení ADXL343 disponuje vysokým rozlišením (13 bitů) a měření až do ± 16 g. Digitální výstup dat je formátován jako 16bit a je přístupný buď se *SPI* (3- nebo 4- drát) nebo *I2C* digitální sběrnici. Jeho vysoká rozlišení (3,9 mg / LSB) umožňuje měření sklonu pro úhly menší než 1,0 °. Používá některé speciální snímací funkce jako „*aktivita a nečinnost*“ umožňuje odhalit přítomnost nebo nedostatek pohybu. Funkce „*volný pád*“ snímání detekuje, zda zařízení klesá. Tyto funkce mohou být využity jednotlivě, s použitím jedním ze dvou výstupních pinů přerušeni. Mezi další vlastnosti patří nízká provozní spotřeba 23 μ A a integrované FIFO pro snížení celkového výkonu systému. Široký rozsah napájecího napětí: 2,0 V až 3,6 V, I/O napětí 1,7 V až VS, rozměry 3 mm \times 5 mm \times 1 mm v pouzdře LGA. [6]

2.6 Akcelerometr KX022 (*Kionix*)

KX022 je robustní, nízkopříkonový, *I2C* / *SPI*, 3osý akcelerometr s integrovaným FIFO / FILO vyrovnávací paměti, která je k dispozici široká škála vestavěných funkcí, včetně detekce kohoutku, orientace, činnosti, a buzení algoritmy. XAC senzor Kionix poskytuje vynikající stabilitu s na trhu-vedoucí kombinací zlepšené šoku, přetavení, a tepelný výkon. Uživatelsky nastavitelné parametry zahrnují ± 2 g, 4 g nebo 8 g rozsahy, 16bitovým rozlišením pro větší přesnost, výstupní data (ODR) s programovatelnou horní a dolní propustí. Snímání zrychlení je založen na principu diferenciální kapacity vyplývající ze zrychlení vyvolaného pohybu citlivosti prvku. Regulátory napětí udržují stálé vnitřní provozní napětí při rozsahu vstupních napájecích napětí. To má za následek stabilní provozní vlastnosti v celém rozsahu vstupního napájecího napětí. Použito je ultra-malé plastové, 12-vývodové LGA pouzdro, rozměry 2x2x0.9mm. [7]

2.7 Snížení spotřeby procesoru EFM32

2.7.1 Snížení statického proudu

GPIO výstupy a vstupy

Všechny nezapojené vývody na EFM32 by měly být nakonfigurovány jako GPIO (vypnuto). V tomto nastavení, jsou jak vstup a výstupní rozhraní jsou vypnuty. Pokud by byl povolen vstup, mohlo by to vést k častému přepínání porovnávacího obvodu a by mělo za následek zvýšenou spotřebu energie. Z resetu, všechny piny GPIO jsou konfigurovány jako zakázány, s výjimkou *DEBUG* vývodů, které jsou povoleny s *pull-up* (*DBG_SWDIO*) a *pull-down* (*DBG_SWCLK*) rezistory. Piny používané analogovými periferiemi (jako ADC vstupy) by se za normálních podmínek měly být zakázány. [8]

Deaktivace RAM bloků

Když je zařízení v EM2 nebo EM3 režimu, paměti RAM významně přispívají k celkové spotřebě elektrické energie. Některé procesory řady EFM32 nabízejí možnost zakázat některé z bloků paměti RAM (bity v *EMU_MEMCTRL*), a zařízení bude mít nižší spotřebu energie. Např. v zařízení *Gigant Gecko*, se proud snížil o přibližně 170nA na každém vypnutém 32KB bloku. Všechny bloky se automaticky aktivují při resetu procesoru. [8]

Analogové zkreslení

Většina analogových periférií, jako *DAC*, *ACMP* atd. zahrnují klidový proud nastavení programování. Snížení klidový proud na tyto periferie sníží spotřebu energie, ale mějte na paměti, že bude také ovlivněn analogový výkon. Analogové zkreslení a referenční nastavení ovlivňují pouze spotřebu energie, zatímco periferní je povolen (např. EN bit v *ACMP_CTRL*). Je důležité poznamenat, že vypnutí hodin do periferního (např. *ACMP0* bit v *CMU_HFPERCLKEN0*) nesnižuje energii spotřebovanou na analogové části periférií, ale pouze vypíná činnost v digitální řídicí logiky periférii. [8]

Napájecí napětí

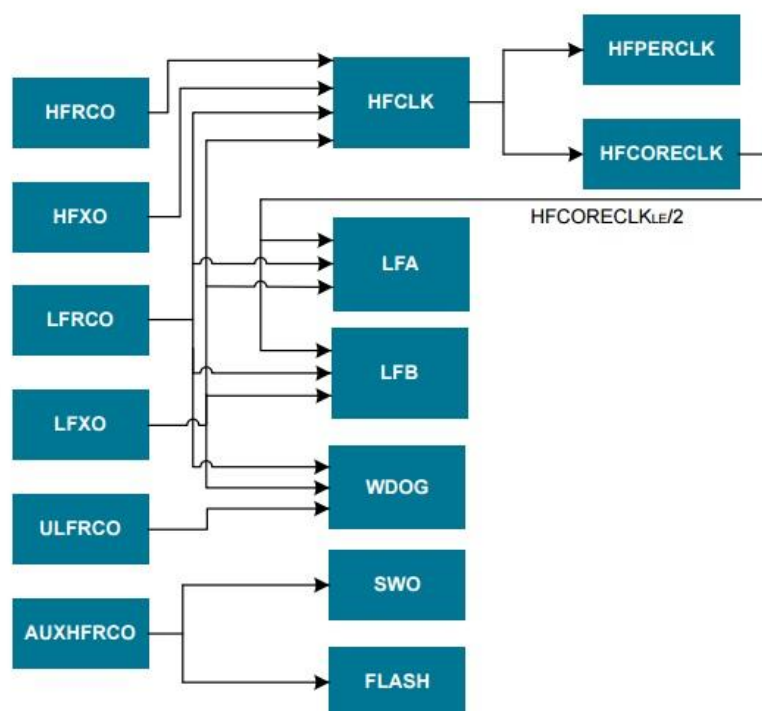
Hladina proudu odebíraného CMOS logikou je proporcionální s použitým napájecím napětím. EFM32 obsahuje interní 1,8 V lineární regulátor, který odvádí extra výkon při použití napětí nad 1,8 V.

2.7.2 Snížení dynamické proudu

Pro baterie provozovaných aplikací, které běží z omezeného zdroje energie je velmi důležitá. K nižší spotřebě energie, je proto důležité snížit čas strávený v režimech s vyšší spotřebou energie. V EFM32, můžete si vybrat mezi několika různými oscilátory, jak plně interní RC oscilátory, externí, nebo krystal, keramické oscilátory. [8]

Generování hodiny

Nastavení hodinového taktu je jedním z řešení, kterým je možné jednoducho ušetřit energii, tj. snížit spotřebu aplikace. U EFM32 je možné vybrat z několika různých oscilátorů, jako je interní RC oscilátor, externí krystaly anebo externí hodinový zdroj.



Obr. 2-5 Přehledový diagram oscilátorů rodiny EFM32 [9]

Hodinové signály u EFM32 jsou rozdělené na dvě části: vysokofrekvenční (HF) a nízkofrekvenční (LF). Normálně se vybírají HF hodiny na úlohy vykonávané v aktivním režimu a LF hodiny pro periférie pracující v režimu spánku. Při výběru oscilátorů pro periférie je důležité zvolit taký, který má pracovní frekvenci nejvhodnější pro požadovaný takt. To je potřebné z důvodu, že dělič frekvence (*prescaller*) použije dodatečné obvody, které vyvolávají další spotřebu v systému. [2]

Optimalizace překladače kódu

Platí obecné pravidlo, že vyšší nastavení optimalizace kompilátoru vede k energeticky účinnějšímu kódu. Zatímco optimalizace pro rychlost snižuje čas v aktivním režimu, optimalizace pro velikost snižuje množství paměti, což opět snižuje spotřebu energie. Experimentování s tímto nastavením, může přinést významné úspory energie.

Podmínkové cykly

Podmínkové cykly (*while, loops*) mohou být použity na zastavení zpracování *CPU* v určité fázi programu, dokud jistá podmínka nebude splněna. Podmínka může být např. čekání na stabilizaci oscilátoru anebo přicházející informace ze sériového rozhraní UART. Avšak cykly, kde *CPU* neustále hlídá stav určité podmínky způsobuje, že proces není energeticky úsporný. Z tohoto důvodu je potřebné použít přerušení, kterým je procesor uveden do režimu spánku a probudí se tehdy, až je splněna. Pokud událost nedisponuje hardwarovým přerušením, je možné využít časovač RTC (*real time counter*), ten periodicky generuje probouzení procesoru a následně provede kontrolu. Procesor Cortex-M3 vyžaduje 12 cyklů pro vystoupení z vektoru přerušení (ISR). Avšak je možné probudit se ze zdroje přerušení, bez využití ISR, pomocí čekání na událost (WFE - *wait for event*), a tím ušetřit značné množství cyklů CPU. [2]

DMA

EFM32 obsahují DMA řadič, který může být použit pro snižování zátěže CPU manipulací některé z paměťových převodů. Kromě uvolnění procesorového času, to také umožňuje pro úspory energie, jako je CPU, můžete strávit svůj čas uvolněna ve spánku. V závislosti na implementaci SW, bude DMA v mnoha případech rychlejší než s použitím CPU i, což umožňuje celou přenos paměti až do konce rychlejší a čas, který bude strávený v nejnižších energetické režimy. Jako každý zahájeno DMA má určitou režii v hodinových cyklů (načítání deskriptorů dat atd.), DMA je nejúčinnější při přenosu větších bloků dat v jednom kroku, a to je také, kde může být nejvyšší úspory energie dosaženo.

Periferní Reflex Systém (PRS)

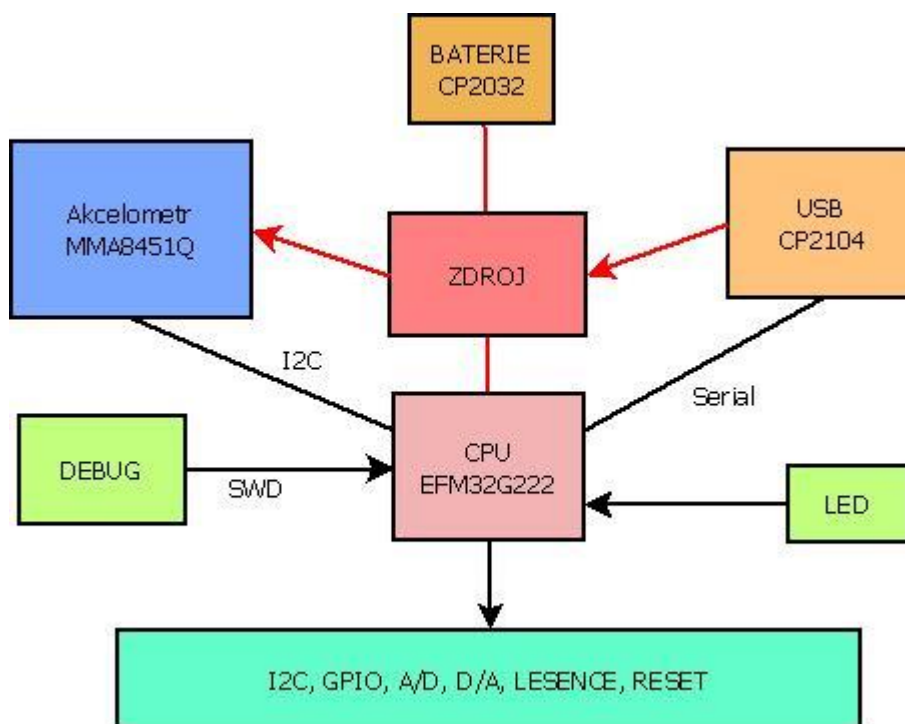
Zatímco DMA napomáhá snižování zátěže CPU převody dat mezi paměťmi, periferní *Reflex Systém* (PRS) snižuje zátěž CPU tím, že periferie přímo komunikují mezi sebou přes přerušení. Konfigurovatelný kanálový systém VAS může být například použit pro přenos spouštěcích signálů z časového spínače do ADC v pravidelných intervalech.

3 Návrh řešení senzorového modulu

Senzorový modul je sestaven takovým způsobem, aby ověřil úkol zadaný diplomovou prací. Procesor snímá z akcelerometru data v časových intervalech a vyhodnotí, zda došlo k pohybu nebo ne a za cenu co nejmenší spotřeby.

3.1 Základní bloky senzorového modulu

Mezi zmiňované patří procesor EFM32G222F128, jako senzor akcelerometr MMA8451Q, o komunikaci se stará převodník USB-sériový port CP2104 a vše napájí lithiová baterie CR2032. Na Obr. 3-1 je znázorněn blokový diagram znázorňující propojení jednotlivých komponent.



Obr. 3-1 Blokové diagram senzorového modulu

3.2 Výběr vhodných komponent

3.2.1 Nízkopříkonový mikroprocesor rodiny EFM32

Procesor EFM32 má široký výběr režimů spotřeby energie, které umožňují optimalizovat spotřebu. Široký výběr režimů energie jsou k dispozici v EFM32 umožňuje optimalizovat spotřebu energie systémy pro splnění malé energetické nároky a to jak v oblasti buď aktivním a klidového režimu. Velmi krátká doba přechodu mezi režimy energie v kombinaci s autonomními provoz v režimech s nízkou energií ve prospěch dlouhé doby spánku. Ve všech ale nehlubší aplikační data režim energie je udržována s plnou zachování RAM.

Cortex M3 RICS poskytuje v aktivním režimu vysoký výkon, odezvu systému, a nízkou spotřebu energie. Pomocí integrovaných periférií a rychlých přerušení se EFM32 velmi dobře hodí pro bateriový provoz a pro aplikace náročné na dobu odezvy. V aktivním režimu průmyslový standard Cortex-M3 RISC procesor poskytuje vysoký výkon z hlediska výpočetního výkonu, odezvy systému, a nízkou spotřebu energie. Náročné úkoly jsou zpracovány procesorem a vysoce integrované periferie, a nakládání s rychlou přerušení a nízká latence činí EFM32 velmi dobře hodí pro bateriový provoz aplikací a systémů kritickou dobou odezvy.

3.2.2 Akcelerometr MMA8451Q (Freescale)

Jako zvolený obvod pro aplikaci senzorový modul byl zvolen díky svým vlastnostem právě obvod od firmy Freescale MMA8451Q.

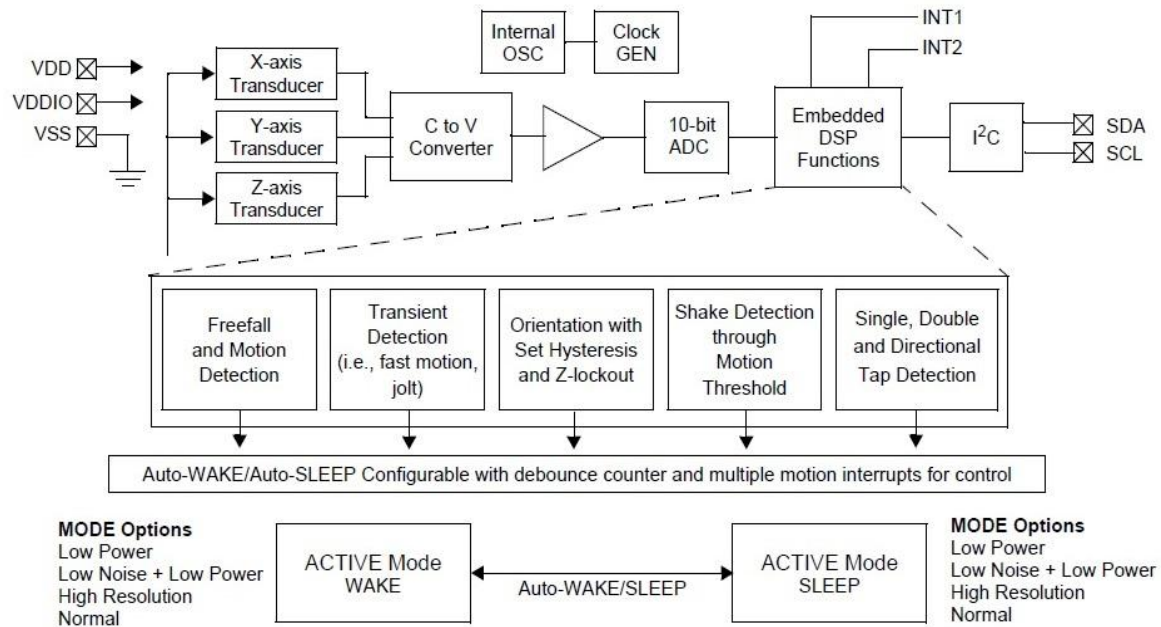
Mezi základní vlastnosti patří:

- 1.95V to 3.6V napětí analogové části, 1.6V to 3.6V napětí logiky
- $\pm 2g/\pm 4g/\pm 8g$ dynamicky výběr měřítka, horní propust, použití FIFO,
- Detekce: pohybu, volný pád, pulz, orientace,
- spotřeba: 6 μA to 165 μA

Právě spotřeba byla rozhodujícím parametrem a oproti konkurenci byla nejlepší.

- **Citlivost**

Citlivost je zastoupena v počtu jednotek na g. V režimu 2g je citlivost 4096 jednotek na g. V 4g režimu je citlivost 2048 jednotek na g a v režimu 8G je počet jednotek 1024 na jednotku g.



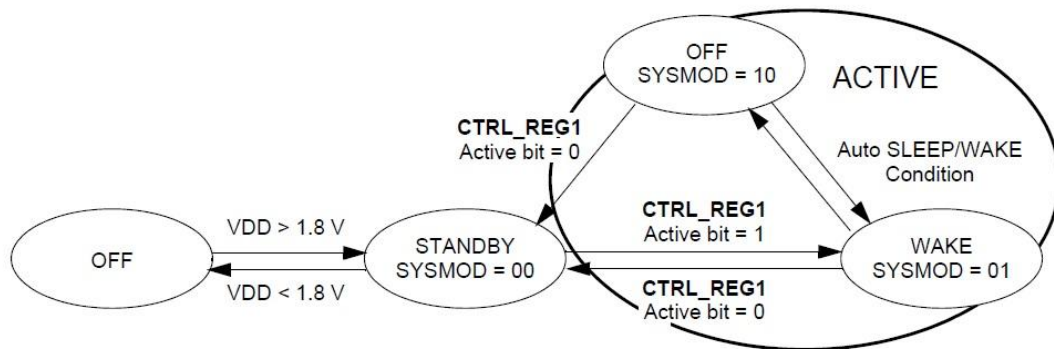
Obr. 3-2 Blokový diagram akcelerometru MMA8451Q [10]

- **Zero-g Offset**

Zero-G Offset popisuje odchylku skutečného výstupního signálu oproti ideálnímu výstupnímu signálu, pokud je senzor stacionární. Senzor klidu na vodorovné ploše bude měřit 0 g v ose X a 0 g v Y-ose, zatímco osa Z bude měřit 1g. Výstup je v ideálním případě ve středu dynamického rozsahu snímače (obsah OUT Registruje 0x00, údaje vyjádřené jako 2 doplňku číslo). Odchylka od ideální hodnoty v tomto případě se nazývá *zero-g* posun. Tento parametr upravujeme pro kalibraci akcelerometru např. při nepřesném osazení součástky na DPS. [10]

- **Operační režimy (SYSMOD)**

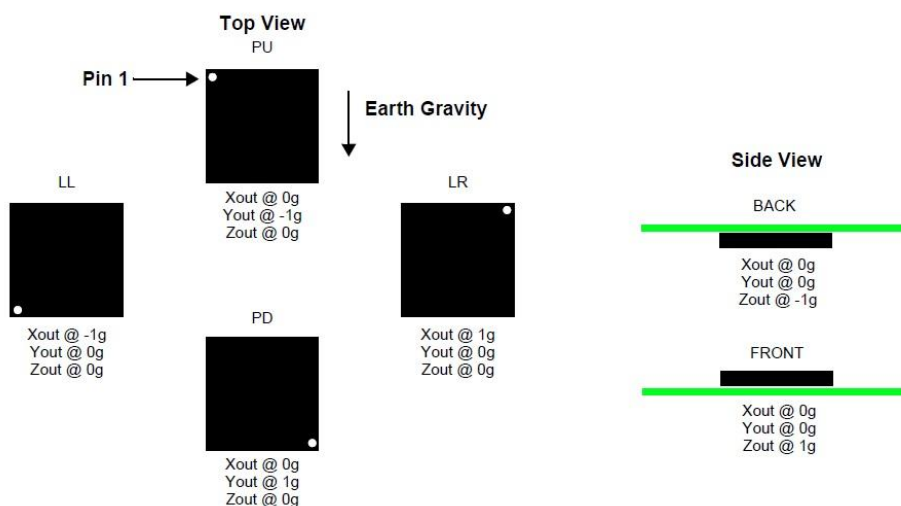
Na Obr. 3-3 je zobrazen diagram režimů akcelerometru který se nastavuje v registru *CTRL_REG1* bitem označeným *Active bit*. Pro změnu většiny parametrů senzoru je nutné tento bit nastavit na 0.



Obr. 3-3 Operační režimy akcelerometru MMA8451 převzato z [10]

- **Detekce orientace**

Akcelerometr MMA8451Q obsahuje detekční algoritmus, který je schopen detekovat všech 6 orientací. Přechod do ležaté polohy je stanoven úhel prahu 45° s $\pm 14^\circ$ hysterezí. To umožňuje hladký přechod do ležaté polohy při přibližně 30° a pak do svislé polohy při přibližně 60° . Úhel, pod kterým zařízení zjistí změnu orientace se označuje jako *Z-lock*. Všechny úhly jsou s přesností $\pm 2^\circ$. [10]



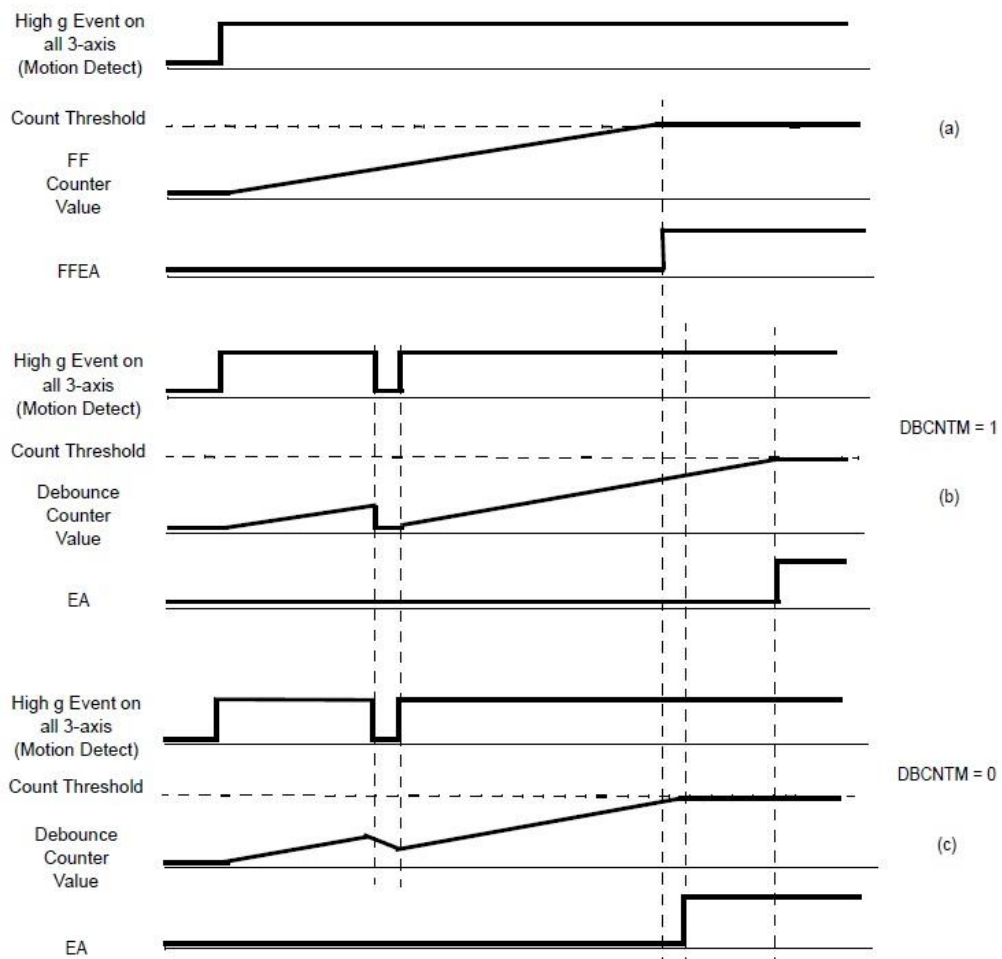
Obr. 3-4 Poloha čipu MMA845x vůči Zemi [10]

- **Rozpoznávání gest**

MMA8451 má vestavěnou detekci jednoduchého a dvojitého švihu. Tato funkce má různé časovače pro přizpůsobení nastavení časového impulsu šířku a latenci mezi pulzy. K dispozici jsou programovatelné prahové hodnoty pro všechny tři osy. Spouštění detekce může být nakonfigurováno pro spuštění pomocí filtru horní propust a také přes filtr dolní propusti, který poskytuje více uživatelských předvoleb. Stavový registr poskytuje aktualizace na všech osách, kde byla zjištěna událost a směr pohybu. [10]

- **Detekce pohybu (*Motion*)**

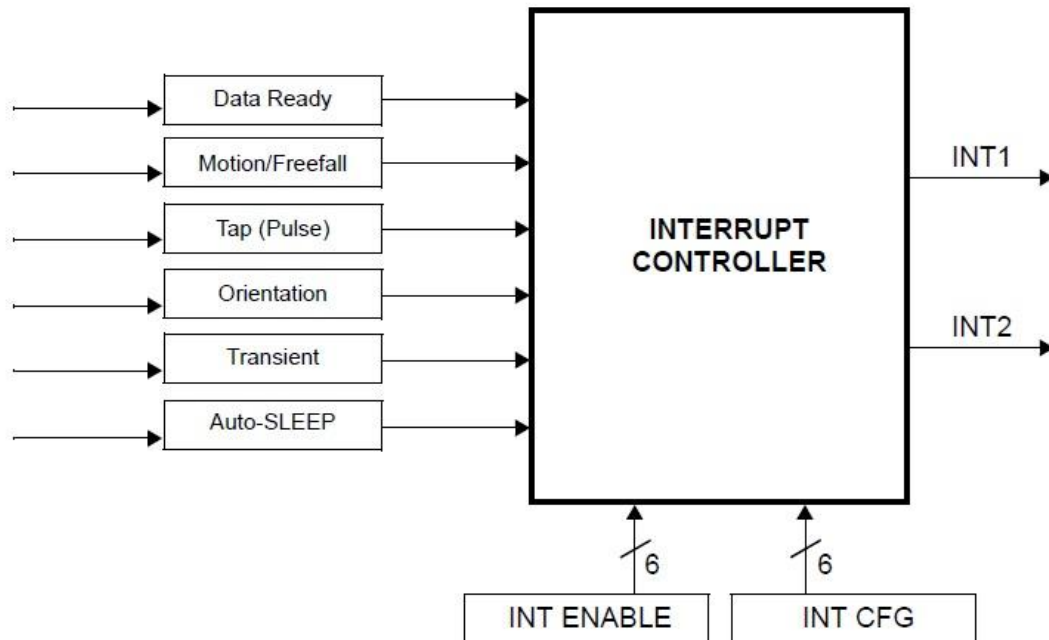
Detekce pohybu se používá ke sdělení informace procesoru, že senzor se hýbe. Pokud akcelerace překročí nadefinovanou mez, je vysláno přerušení.



Obr. 3-5 Nastavení hranice vzniku přerušení (*threshold*) [10].

- **Detekce volného pádu (*Freefall*)**

Detekce spočívá v monitorování souřadnic x, y, z za podmínky, že hodnota neklesne pod uživatelem nastavenou mez pro všechny souřadnice současně. Normálně se nastavuje ± 100 mg až ± 500 mg.



Obr. 3-6 Blokový diagram vstupů a výstupů akcelerometru MMA8451 [10]

Přechodná detekce (*Transient Detection*)

Akcelerometr MMA8451 obsahuje horní propust. Data procházejí přes filtr a eliminují stejnosměrnou složku a nízké frekvence. Touto detekcí lze měřit dynamické zrychlení jelikož se odstraní gravitace Země.

Porovnání akcelerometru MMA8451 a KX022

Mezi vybranými typy se rozhodovalo mezi dvěma akcelerometry, které mají podobné vlastnosti i spotřeby.

Tab. 3-1 Porovnání akcelerometru MMA8451 a KX022

Položka	MMA8451Q	KX022	jednotky
Rozsah	± 2, 4, 8Gs,		
Rozlišení	14bit		
Citlivost, nejlepší (max. rozlišení)	4096 @ ± 2 g		jednotek/g
Citlivost, nejhorší (max. rozlišení)	1024 @ ± 8 gs		jednotek /g
Šum, normální stav	126	150	μg/Hz
Šum, mód nízké spotřeby	99	150	μg/Hz
Výstupní frekvence	1.56 – 800	0.781 – 1600	Hz

Rozdíly ve spotřebě jsou velice podobné, pro naše použití lépe vyhovuje MMA8451 díky tomu, že budeme využívat mód nízké spotřeby @ ODR = 1.56 Hz na 6 μA po celou dobu, nebudeme přecházet do pohotovostního režimu.

Tab. 3-2 Spotřeba MMA8451 vs KX022

Operační mód	MMA8451Q	KX022	jednotky
normální stav @ ODR = 800 Hz	165	130	μA
normální stav @ ODR = 1.56 Hz	24	130	μA
mód nízké spotřeby @ ODR = 800 Hz	165	–	μA
mód nízké spotřeby @ ODR = 25 Hz		10	μA
mód nízké spotřeby @ ODR = 1.56 Hz	6	–	μA
pohotovostní stav	1.8	2	μA

V přehledu funkcí vítězí obvod KX022 nicméně tyto funkce pro náš účel nejsou důležité, rozhodovat se budeme v tomto případě na základě spotřeby.

Tab. 3-3 Porovnání funkcí akcelerometrů MMA8451Q a KX022

Funkce	MMA8451Q	KX022
Pohyb (<i>Motion</i>)	ano	
Detekce klidu	ano	ne
Detekce dvojitého klepnutí	ano	
Orientace (<i>Tilt</i>)	ano	
Volný pád (<i>Freefall</i>)	ano	
FIFO	ano	
počet pinů přerušení	2	

3.2.3 Vývojový modul

Jedním z modulů, který byl k dispozici je Wonder Gecko

- **Popis**

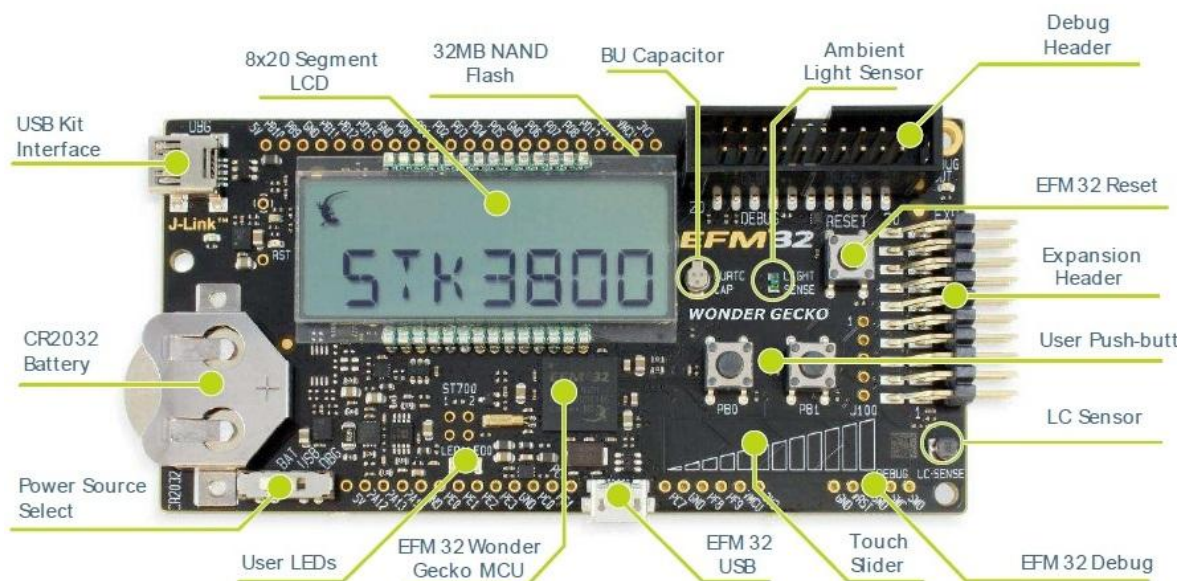
EFM32WG-STK3800 je výborná pomůcka pro seznámení se s EFM32 mikroprocesory. Sada obsahuje senzory a periférie, které jsou připojeny k MCU a pomocí SW lze otestovat jeho vlastnosti. Modul může také sloužit jako výchozí bod pro vývoj aplikací. [11]

- **Vlastnosti**

- EFM32WG990F256 MCU s 256KB Flash a 32 kB RAM paměti,
- 32 MB NAND Flash paměť
- Monitorovací systém *Advanced Energy* pro přesné sledování aktuální spotřeby
- Integrovaný *Segger J-Link USB debugger* / emulátor s debug funkcí.
- 160 segmentů LCD, 20 pin rozšiřující patice.

- pro snadný přístup k CPU jsou na obvod vyvedeny vstupně-výstupní piny.
- zdroje jsou použity USB a baterie CR2032.
- 2 uživatelská tlačítka, 2 uživatelů LED a dotykový posuvník.
- světelný, induktivní a kapacitní senzor.
- USB mikro-AB (*OTG*) konektor.
- 0.03F super-kapacitní kondenzátor pro záložní napájení
- Krystaly pro LFXO a HFXO: 32.768kHz a 48.000MHz

Modul lze využít také jako programátor pro vlastní aplikaci přepnutím DEBUG konektoru jako výstup, s vyvíjeným modulem se pak pracuje stejným způsobem jako s vývojovým modulem. [11]



Obr. 3-7 Popis komponent modulu Wonder Gecko [11]

3.3 Přenos dat

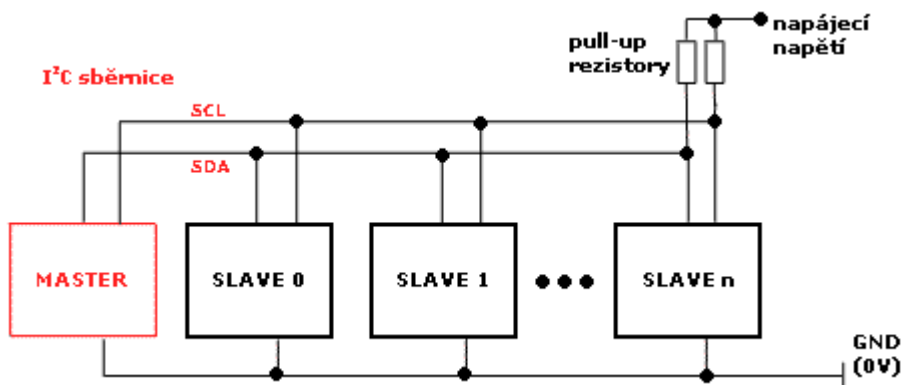
3.3.1 I²C komunikace

I²C bus je zkratka, která vznikla z IIC bus, tedy *Internal-Integrated-Circuit Bus*. Jedná se o interní datovou sběrnici sloužící pro komunikaci a přenos dat mezi jednotlivými integrovanými obvody obvykle v rámci jednoho zařízení. Mezi zařízení používající I²C patří především mikrokontroléry, sériové paměti, inteligentní LCD, audio a video obvody,

a/d a d/a převodníky a některé další digitálně řízené obvody. Hlavní výhoda spočívá v obousměrném přenosu pouze po dvou vodičích - "data SDA (serial data)" a "hodiny SCL (serial clock)". To výrazně optimalizuje nároky na počet vstupně-výstupních pinů u procesorů a celkově zjednodušuje výsledné zapojení. [12]

Na jednu sběrnici může být připojeno více integrovaných obvodů. V základní verzi jsou obvody adresovány 7bitově a v rozšířené verzi 10bitově. To umožňuje připojení 128 respektive 1024 čipů s různou adresou na jednu společnou sběrnici. Přenosová rychlost sběrnice je pro většinu aplikací dostatečná i v základní verzi, kde je frekvence hodin 100kHz. Ve vylepšených verzích to může být 400kHz nebo 1MHz, ale ne všechny integrované obvody tuto verzi podporují. Rychlost přenosu pak musí být přizpůsobena pochopitelně nejpomaleji komunikujícímu čipu na sběrnici. [12]

Oba vodiče musí být implicitně v logické jedničce a to je zajištěno *pull-up* rezistory. Jejich odpory mají hodnotu v řádech jednotek kilo-ohmů. Čím je vyšší komunikační frekvence, tím musí být nižší hodnoty těchto odporů. Pro 100kHz postačuje 4k7.



Obr. 3-8 I2C zapojení Master a Slave [12]

- **Princip přenosu**

Jeden z integrovaných obvodů (většinou mikrokontrolér) je nastaven jako MASTER a všechny ostatní obvody jsou SLAVE. Obvody se dají zapojit i jako tzv. multi-master, kdy je čipů master několik. Master při jakémkoli přenosu generuje hodinový signál na vodiči SCL. Když jeden čip vysílá, přijímají všechny ostatní a pouze podle adresy určují, zda jsou data určena jim. Čip, který chce vyslat/přijmout data musí nejprve

definovat adresu čipu, s kterým chce komunikovat a zda půjde o příjem nebo vysílání - tedy o čtení nebo zápis. To určuje R/W (read/write) bit, který je součástí adresy. [12]

- **Přenos probíhá kombinováním následujících celků:**

stav klidu - Je zajištěn logickými jedničkami na obou vodičích, master tedy negeneruje hodinový signál a neprobíhá žádný přenos. Logické jedničky jsou na obou vodičích zajištěny *pull-up* rezistory, takže klidový stav nastane i pokud jsou výstupy obvodu master ve stavu vysoké impedance.

start bit - Zahajuje přenos nebo jeho další část. Je vygenerován tak, že se změní úroveň SDA z 1 na 0 zatímco je SCL v logické 1.

stop bit - Ukončuje přenos. Je vygenerován podobně jako start bit. Logická úroveň SDA se změní z 0 na 1 zatímco je SCL v logické 1. Stop bit může být generován pouze po "nepotvrzení přenosu", tedy pouze po přijmutí Ack v logické 1. (viz níže)

přenos dat - Data jsou přenášena po 1Byte tedy 8 po sobě jdoucích bitů od nejvyššího po nejnižší. Při přenosu dat se může logická úroveň na SDA měnit pouze pokud je SCL v logické 0. Při každém pulzu na SCL je přenesen jeden bit.



Obr. 3-9 Komunikace I2C mezi EFM332 a akcelerometrem MMA8451

potvrzující bit Ack (acknowledge) - Tento bit slouží k potvrzení správného přijmutí dat. Ack bit se odesílá stejným způsobem jako by se odesílal devátý bit dat, ale s tím rozdílem, že ho generuje čip, který přijímal (přijímač) a nikoliv ten který data odesílal. Pokud přenos proběhl v pořádku tak odešle logickou 0. Logická 0 potvrzujícího bitu znamená rovněž to, že je přijímač připraven na příjem dalšího byte, který následuje okamžitě po něm při dalším pulzu na SCL. Pokud přenos selhal odešle logickou 1. Nebo pokud má dojít k ukončení přenosu, tak "neodešle nic". Pull-up rezistor pak zajistí, že bude na SDA logická 1 a Ack bit (v logické 0) odešle vysílač. [12]

- **Spolehlivost, konstrukční řešení**

Především při vyšších přenosových rychlostech respektive hodinových frekvencích (400kHz a 1MHz) a delších vodičích SCL a SDA by mohlo při nesprávném návrhu plošného spoje nebo celé konstrukce docházet k rušení a chybám v přenosu. Kromě potvrzujícího bitu *Ack* není přenos nijak kontrolován. Bit *Ack* potvrzuje pouze přenesení každého Byte dat, ale ne to, zda byla data přenesena správně. Proto je vhodné, aby byly vodiče SDA a SCL co nejkratší a aby se v jejich blízkosti nevyskytovaly výkonné nebo vysokofrekvenční obvody. Také doporučuji vyvarovat se vzniku zemních smyček. [12]

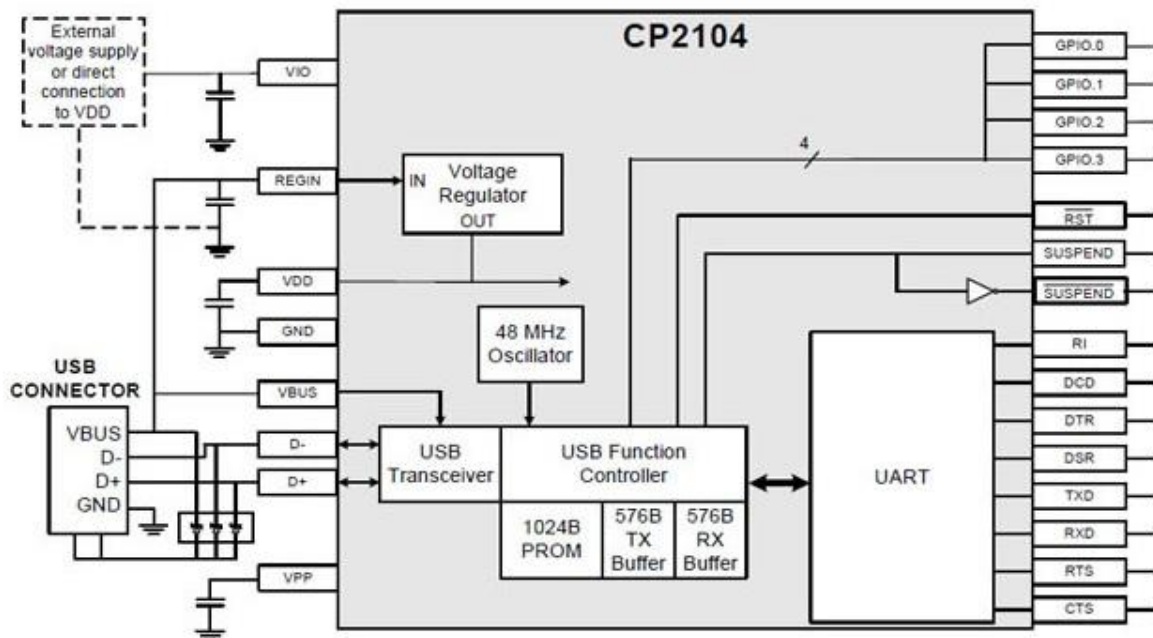
3.3.2 Převodník USB - sériový port

Jako převodník USB na RS232 byl použit obvod CP2104. Poskytuje jednoduché obvodové řešení pro převod RS-232 na USB za pomoci minima komponent i prostoru na plošném spoji. Spotřeba několikrát převyšuje spotřebu ostatních součástek, avšak převodník bude použit pouze příležitostně na konfiguraci a bude napájen přímo z USB portu osobního počítače. [13]

Obvod CP2104 obsahuje regulátor napětí, USB vysílač, oscilátor, jedenkrát programovatelné ROM paměti a asynchronní sériová datová sběrnice UART v kompaktním 4 x 4 mm v pouzdře QFN-24. Nejsou zapotřebí žádné další externí komponenty USB.

On-chip programovatelné ROM paměti mohou být použity k přizpůsobení ID USB, kde si uživatel má možnost nastavení názvu, řízení napětí, popis zařízení, sériové číslo a konfigurace GPIO žádoucí pro OEM aplikace.

Výhoda poskytovaných ovladačů od firmy Silicon Labs je vytvoření virtuálního COM portu v počítači, takže obslužná aplikace přímo pracuje se sériovým portem zapojeným do procesoru EFM32. CP2104 rozhraní provádí veškeré převody signálů, včetně kontroly a řízení toku, takže existující systémový firmware není třeba měnit. Obvod obsahuje také až čtyři GPIO signály, které mohou být uživatelsky definované pro další využití. [13]



Obr. 3-10 Blokový diagram převodníku CP2104 převzato z [13]

- **Funkce USB řadič a vysílač**

USB řadič řídí všechny datové převody mezi USB a UART, stejně jako řídicí příkazy plynoucí z hostitelského řadiče USB a příkazy pro řízení funkce UART a GPIO pinů. Pro řízení spotřeby řadič pozastavuje a obnovuje signály, a to jak CP2104 zařízení, tak i externí obvody. CP2104 přejde do režimu spánku, pokud je detekován na sběrnici signalizace *Suspend*. Při přechodu do režimu spánku, CP2104 prosadí pozastavit a odložit signály. Převodník ukončí režim spánku, když nastane jedna z následujících situací:

- detekováno nebo generováno obnovení signalizace
- detekován USB reset signál, nebo dojde k resetu zařízení
- signál na výstupu *Suspend*

Signál *Suspend* se při resetu zařízení nastaví na vysokou úroveň. Je-li toto chování nežádoucí, může být použito k zajištění *pull-down* rezistor (10 k Ω), potom zůstane při resetu hodnota nízká. Logické úrovně a režim výstup (push-pull nebo open-drain) různých GPIO pinů během pozastavení USB řadiče je konfigurovatelný v paměti PROM. [13]

3.4 Napájení

Napájení sensorového modulu je prováděno dvěma způsoby. Při připojení do počítače je procesor napájen přes převodník USB-seriál CP2104. Při provozu Demo režimu pak pomocí baterie.

3.4.1 Baterie

Jako zdroj energie byl použit lithiový článek. Ten se vyznačuje velmi dlouhou životností i dostupností a používá se například i jako zdroj pro kardiostimulátory, kde specializované lithiové baterie dosahují životnosti 15 a více let. Složení článku se nejčastěji využívá lithia jako anody, a jako katody oxidu manganičitého. Elektrolyt je lithiová sůl rozpuštěná v organickém rozpouštědle.

Malé lithiové baterie se používají v malých elektronických zařízeních např. hodinky, teploměry, záložní baterie hodin v PC. Kapacita námi použité baterie CR2032 je přibližně 225 mAh ($\pm 5\%$).

3.5 Programové vybavení

3.5.1 Programovací prostředí *Simplicity Studio*

Je kompletní softwarový balíček pro práci s nízko-příkonovými procesory EFM32. Aplikace je poměrně jednoduchá, psaná v anglickém jazyce. Po spuštění se zobrazí rozcestník s aplikacemi, v levém okně typ připojeného modulu, typ detekovaného mikroprocesoru s podrobným výpisem jeho vlastností (typ, velikost paměti, rychlost, typ jádra, počet pinů aj.) a pod ním ty nejzákladnější dokumentace vždy ke konkrétnímu typu MCU. Mezi hlavní aplikace patří:

Simplicity IDE

Vývojové prostředí založené na *Eclipse IDE*, je navrženo tak, aby zvýšila produktivitu programátora pomocí provázaných komponent. To znamená, že programátor nemusí tolikrát přepínat mezi jednotlivými módy jako při použití individuálních vývojových nástrojů. V tomto prostředí se programuje pomocí jazyka C.

Energy Profiler

Analyzuje současnou spotřebu v reálném. Možností je rychle identifikovat oblasti kódu, které čerpají nejvíce energie a vizualizovat spotřebu na základě kódu programu.

Kit manager

Je nástroj sloužící k ovládní podporovaných startovacích a vývojových kitů. Zobrazuje informace o procesoru, informace o typu kitu, verzi FW, lze zde nastavit vlastnosti Debug konektoru (možnosti: vypnuto, pro vývojový typ, jako vstup externího programátora, jako programátor pro externí aplikaci).

Flash programmer - Jednoduchá unutilitka na nastavení a obsluhu programátora EFM32.

Adware Designer - Správa přiřazení pinů CPU a řešení konfliktů pinů, nastavení vlastností periférií procesoru, grafické konfigurační nástroje pro EFM32 MCU.

SWO Terminal – zobrazení informací při ladění programu procesoru

Energy Adware Battery - Kalkulačka pro výpočet výdrže výsledné aplikace pro daný typ baterie, spočítá průměrnou spotřebu na základě použitých energetických modulů a jejich aktivovaných komponent.

Dále je tu spousta drobných pomocníků (*University*), příkladů (*Software example*), odkazů do internetu, seznamů videí (*Silicon Labs Videos*), dokumentace (*Software documentation, documentation, aplikation notes*), demo příklady (*Demos*).

3.5.2 SW pro návrh plošných (EAGLE)

Jako pomocník při návrhu plošných spojů byl použit software od firmy CadSoft Eagle Light verze 7.2. Tato verze může být používána volně s určitým omezením. [14]

- Použitelná plocha desky je omezena na 100 x 80 mm (4 x 3.2 palce).
- Mohou být použity jen dvě signálové vrstvy spojů (vrchní a spodní strana).
- Editor schématu může vytvořit schéma pouze na jednom listu.
- Použití je omezeno na nevýdělečné aplikace nebo studijní účely.

To umožňuje používat *EAGLE Light* každému, kdo ho má pro svého osobního koníčka. Studenti mohou používat tuto verzi pro libovolné vzdělávací projekty.

Eagle obsahuje základní tři moduly a jsou obsluhovány z jednoho uživatelského prostředí. *Editor spojů*, *Editor schémat* a *Autorouter* a jsou obsluhovány z jednoho uživatelského prostředí. *Autorouter* pro náš účel nebyl využit, cesty byly navrženy a optimalizovány ručně. [14]

Požadavky na systém náročné, stačí splnění následujících parametrů, PC, Windows 7 - 8.1, MAC System X nebo Linux (kernel 2.6 nebo vyšší) , myš, 2GB RAM, a 200MB místa na disku, což splňuje většina dnešních počítačů personálních počítačů.

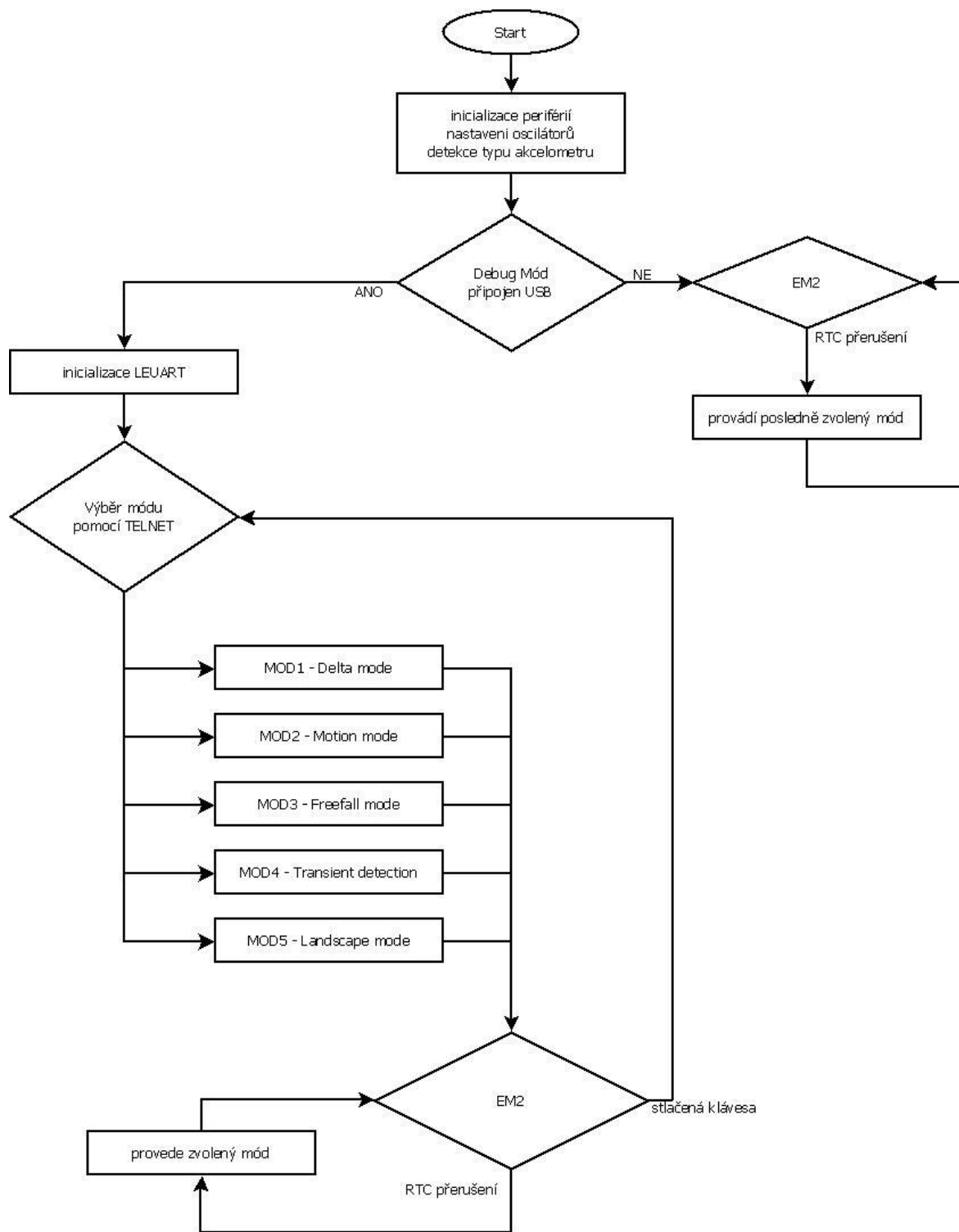
4 Dosažené výsledky

4.1 Firmware pro procesor EFM32G22F128

Po seznámení a vytvoření schématu zapojení se začalo s programováním Procesoru obsaženému na vývojové desce. Zkušenosti s novým typem procesoru nebyly valné, avšak velická podpora na internetu dopomohla k rychlému startu, ale také konzultace byly velkým přínosem. Programování probíhalo v jazyku C, a jako programovací prostředí bylo logicky použito od firmy, která námi zvolený procesor vyrábí.

Dosti obtížné bylo procesor na vývojové desce rozběhnout, první kroky od nastavení základních parametrů, výstupních portů, rychlostí sběrnice, napěťových úrovní, dále ovládání výstupních pinů, kde se nejprve zkoušelo ovládání jednoduchých zařízení. Výrazně tomu napomohly vzorové příklady které jsou integrované do vývojového prostředí Simplicity Studio. Dnešní moderní procesory mají velmi pokročilé funkce a takřka neomezené možnosti nastavení. Po zvládnutí základních znalostí ovládání periférií došlo k programování senzorového modulu.

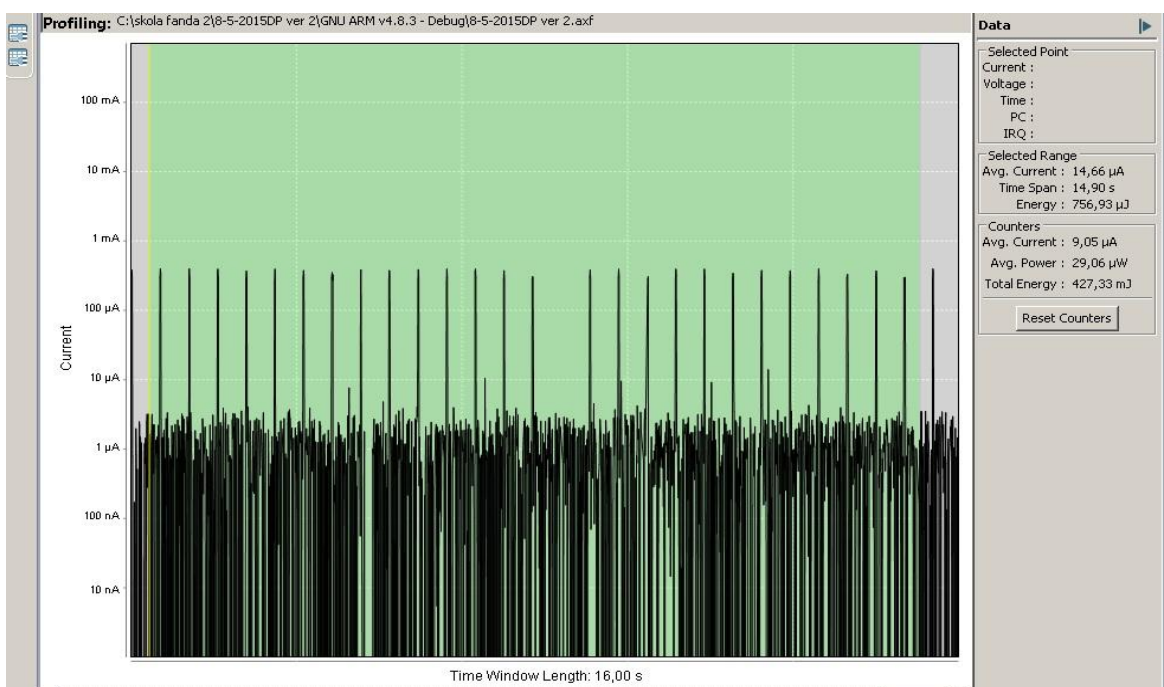
Na Obr. 4-1 je zobrazen stavový diagram procesoru, který popisuje chování aplikace procesoru EFM32. Po resetu proběhne inicializace procesoru, nastavení oscilátorů, nastavení přerušení, výchozí nastavení konstant a proměnných, zapnutí důležitých periférií, nastavení GPIO, inicializace I²C, otestování jaký typ akcelerometru MMA845x je připojen. Poté se provede test, zda je připojeno USB rozhraní, pokud ne, modul předpokládá provoz z baterie a vykonává Demo režim



Obr. 4-1 Stavový diagram firmwaru senzorevého modulu

4.2 Demo režim senzorového modulu

V tomto režimu modul předpokládá napájení z baterie, a proto jsou všechny režimy nastaveny na co nejúspornější režimy. Kvůli úspoře energie systém čeká v energetickém módu EM2 se spotřebou pod $1\mu\text{A}$ a v časových intervalech 500 ms se při probuzení uvede do režimu EM0, kde jeho spotřeba spolu s akcelerometrem činí $590\mu\text{A}$. Tento úsek je velice malý cca 22ms potřebný k získání dat z akcelerometru, výpočtu souřadnic, a vyhodnocení zda došlo k pohybu zařízení.

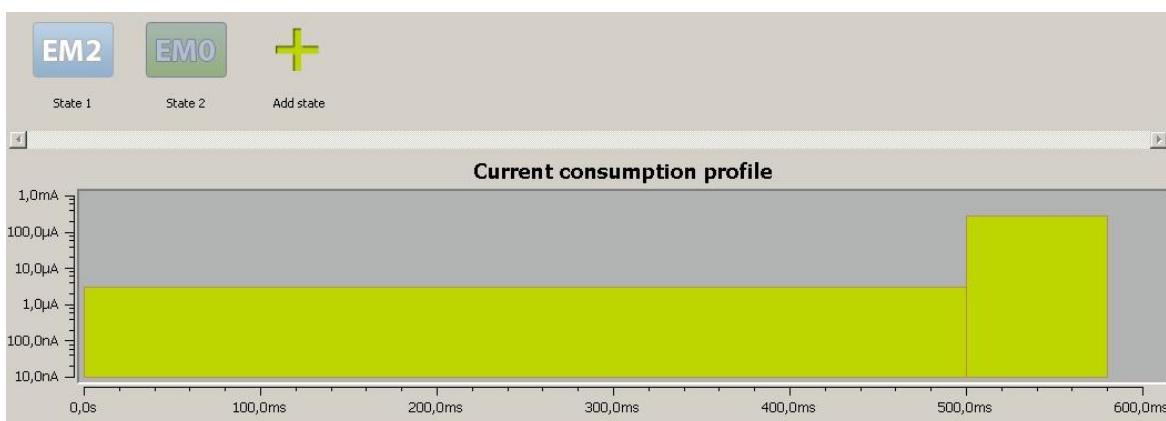


Obr. 4-2 Spotřeba CPU v režimu DEMO

Pokud je detekován pohyb, je po tuto dobu rozsvícena LED, ta má informační charakter, do spotřeby není započítávána (signalizuje událost, kterou zpracovává procesor).

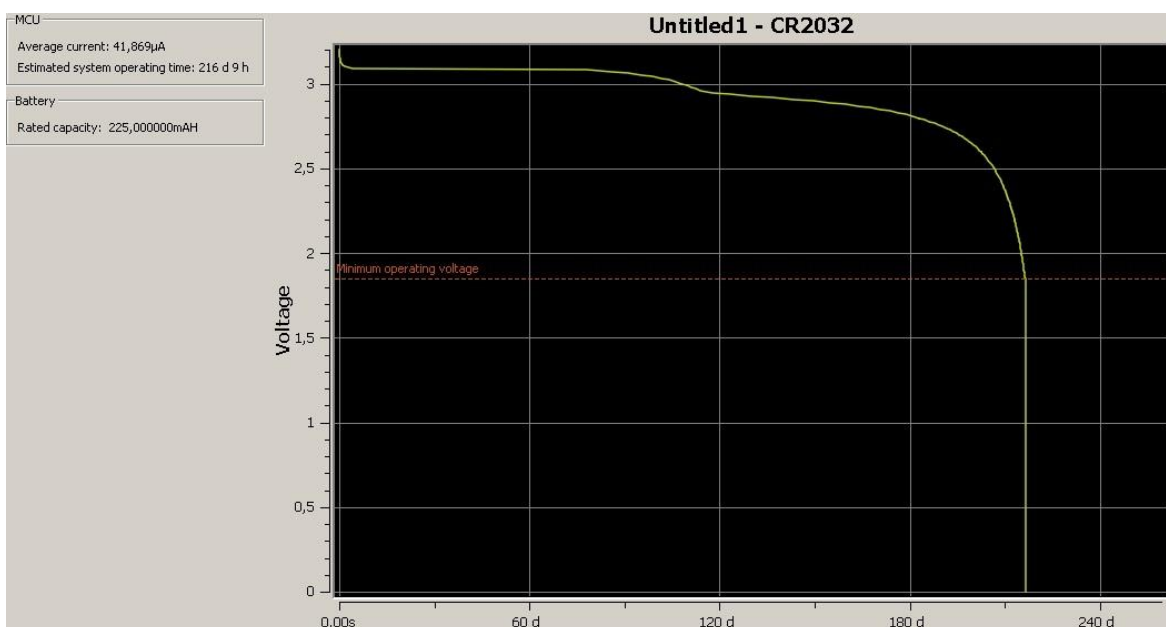
Mezi druhou funkcí režimu demo je vodováha. Při postavení modulu na delší hranu USB konektorem dolů, dojde k vypnutí detekce pohybu a modul zobrazuje pomocí LED vodorovný stav, čím více je předmět ve vodorovném stavu, tím rychleji LED dioda bliká.

Vodováha je zapnutá pro měření $\pm 10^\circ$ jinak přechází do režimu detekce pohybu. Na Obr. 4-3 je zobrazení log. poměru spotřeby celého modulu v jednotlivých energetických módech.



Obr. 4-3 Zobrazení poměru spotřeby v jednotlivých energetických módech celého modulu

Na Obr. 4-4 je vypočítaná doba 216dní při provozu zařízení na baterii CR2032 v režimu DEMO (500ms EM2, 26ms EM0).



Obr. 4-4 Výdrž baterie CR2032 216dní při režimu DEMO (500ms EM2, 80ms EM0)

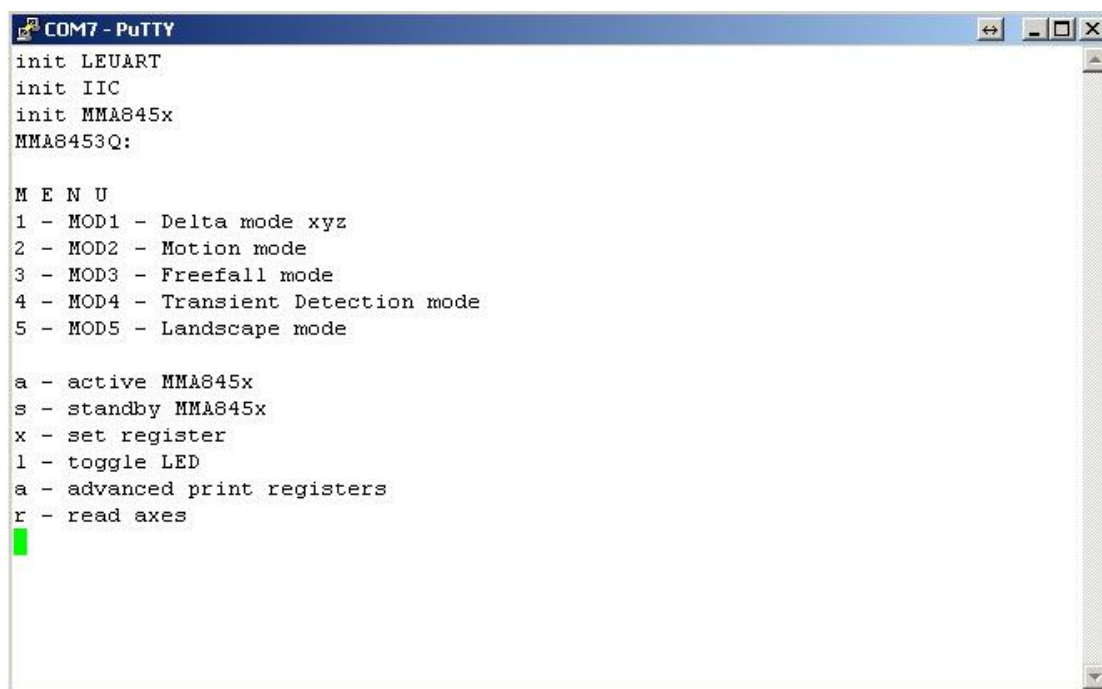
Pokud je detekováno USB, provede se inicializace LEUART a na připojeném PC pomocí konzole je k dispozici stavové menu s různými módy testování MMA8451.

4.3 Komunikace s modulem pomocí konzole

Po připojení modulu k USB se na osobním počítači vytvoří virtuální sériový port, který slouží ke komunikaci s modulem. Nastavení rychlosti na 9600 baud, data bits 8, stop bit 1, parity a flow kontrol na vypnuto. Po resetu zařízení dojde k povolení komunikace s PC a v konzoli osobního počítače se objeví MENU viz Obr. 4-5.

Zde vidíme provedení základních inicializačních procesů prováděných po resetu zařízení jako je inicializace LEUARD (sériový port), inicializace I2C, dále detekován akcelerometr typu MMA8453Q. Pomocí kláves PC lze vybrat požadovanou funkci zobrazenou v MENU.

(MÓD1 – Delta mode xyz, MÓD2 – Motion mode, MÓD3 – Freefall mode, MÓD4– Transient HPF, MÓD5–Orientace mode)



```
COM7 - PuTTY
init LEUART
init IIC
init MMA845x
MMA8453Q:

M E N U
1 - MOD1 - Delta mode xyz
2 - MOD2 - Motion mode
3 - MOD3 - Freefall mode
4 - MOD4 - Transient Detection mode
5 - MOD5 - Landscape mode

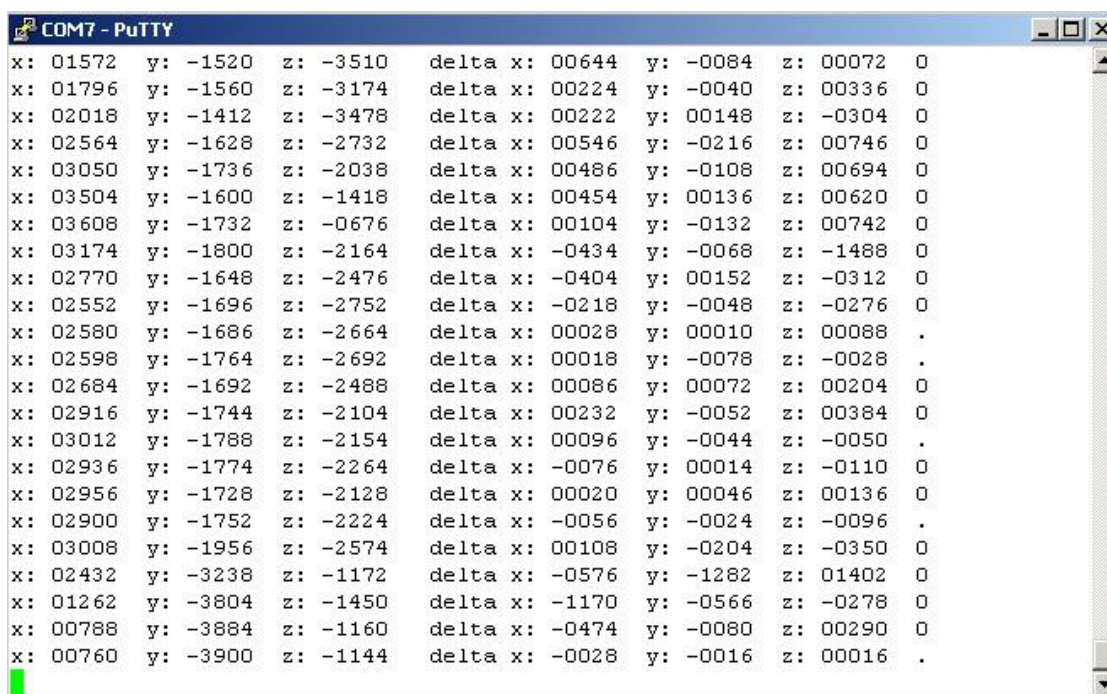
a - active MMA845x
s - standby MMA845x
x - set register
l - toggle LED
a - advanced print registers
r - read axes
█
```

Obr. 4-5 Ukázka MENU senzorového modulu v konzoli

4.3.1 Mód1 x-y-z delta mode

V tomto režimu dochází v časových intervalech ke čtení aktuálních souřadnic. Poslední naměřený údaj se porovná s aktuálně změřeným vzorkem, a pokud je rozdíl větší než nastavená úroveň, dojde k oznámení události Pohyb (Motion). Na jejím základě může být provedeno přesnější měření s možností směru i velikosti zrychlení. Každé měření je v konzole zobrazen řádek s aktuálními souřadnicemi, rozdílové souřadnice a symbol události pohybu viz Obr. 4-6. Během trvání události Pohyb je rozsvícena signalizační LED na senzorem modulu a ve výpisu souřadnic zobrazen místo znaku „,“ znak „0“.

Tento režim nejlépe vyhovoval zadání, protože upozorní na jakýkoli sebemenší pohyb, který byl požadován v zadání. Ostatní režimy měli pro náš účel nějaké nedokonalosti, i když byli o cca 3 μ A úspornější.



```
COM7 - PuTTY
x: 01572 y: -1520 z: -3510 delta x: 00644 y: -0084 z: 00072 0
x: 01796 y: -1560 z: -3174 delta x: 00224 y: -0040 z: 00336 0
x: 02018 y: -1412 z: -3478 delta x: 00222 y: 00148 z: -0304 0
x: 02564 y: -1628 z: -2732 delta x: 00546 y: -0216 z: 00746 0
x: 03050 y: -1736 z: -2038 delta x: 00486 y: -0108 z: 00694 0
x: 03504 y: -1600 z: -1418 delta x: 00454 y: 00136 z: 00620 0
x: 03608 y: -1732 z: -0676 delta x: 00104 y: -0132 z: 00742 0
x: 03174 y: -1800 z: -2164 delta x: -0434 y: -0068 z: -1488 0
x: 02770 y: -1648 z: -2476 delta x: -0404 y: 00152 z: -0312 0
x: 02552 y: -1696 z: -2752 delta x: -0218 y: -0048 z: -0276 0
x: 02580 y: -1686 z: -2664 delta x: 00028 y: 00010 z: 00088 .
x: 02598 y: -1764 z: -2692 delta x: 00018 y: -0078 z: -0028 .
x: 02684 y: -1692 z: -2488 delta x: 00086 y: 00072 z: 00204 0
x: 02916 y: -1744 z: -2104 delta x: 00232 y: -0052 z: 00384 0
x: 03012 y: -1788 z: -2154 delta x: 00096 y: -0044 z: -0050 .
x: 02936 y: -1774 z: -2264 delta x: -0076 y: 00014 z: -0110 0
x: 02956 y: -1728 z: -2128 delta x: 00020 y: 00046 z: 00136 0
x: 02900 y: -1752 z: -2224 delta x: -0056 y: -0024 z: -0096 .
x: 03008 y: -1956 z: -2574 delta x: 00108 y: -0204 z: -0350 0
x: 02432 y: -3238 z: -1172 delta x: -0576 y: -1282 z: 01402 0
x: 01262 y: -3804 z: -1450 delta x: -1170 y: -0566 z: -0278 0
x: 00788 y: -3884 z: -1160 delta x: -0474 y: -0080 z: 00290 0
x: 00760 y: -3900 z: -1144 delta x: -0028 y: -0016 z: 00016 .
```

Obr. 4-6 Výpis konzole senzorem modulu po připojení na USB

Ostatní režimy jsou provedeny kvůli porovnání možností funkcí a spotřeb.

4.3.2 Mód2 - detekce pohybu (*Motion mode*)

Vlastnosti MMA8451 umožňují přednastavené události probouzet procesor pomocí dvou programovatelných výstupu přerušení. Zde se ale požila způsob periodicky probudit procesor a ve stavovém registru 0x0C INT_SOURCE přečte, zda došlo k události motion. K vyvolání přerušení této události dojde při pohybu vyvolaným pohybem zrychlením, které přesáhne uživatelem nadefinovanou úroveň, dojde k rozblikání LED diody dokud není stlačena libovolná klávesa.

4.3.3 Mód3 - volný pád (*Freefall mode*)

Jako u předešlé detekce pohybu i zde se periodicky probudí procesor a ve stavovém registru 0x0C INT_SOURCE přečte, zda došlo k události freefall. K této události dojde pokud všechny souřadnice klesnou pod uživatelem nastavenou úroveň zrychlení. Zařízení je volném pádu – stav beztlíže. Pozitivní stav této události se signalizován rychlým blikáním LED diody, dokud není stlačena libovolná klávesa a stav je popsán v konzoli.

4.3.4 Mód4 - dynamický pohyb (*Transient HPF*)

Velmi podobný detekci pohybu ale je zde použita propust vysokých frekvencí. Data akcelerometru procházejí přes tento filtr a eliminují gravitaci země a nízké frekvence. Výsledek je ten, že data akcelerometru ukazují aktuální zrychlení za daný čas. K vyvolání přerušení této události dojde při pohybu vyvolaným pohybem zrychlením, které přesáhne uživatelem nadefinovanou úroveň, dojde k rozblikání LED diody dokud není stlačena libovolná klávesa.

4.3.5 Mód5 - náklon (*Landscape*)

Modul funguje jako ve stavebnictví známá vodováha. Postavením modulu na nejdelší hranu procesorem k sobě je spuštěna hlídaná událost. Pozitivní stav této události se signalizován rychlým blikáním LED diody, dokud není změněná poloha.

4.4 Senzorový Modul

Při návrhu modulu byl kladen nárok na univerzálnost, co nejmenší výrobní hodnota, a co největší užitná hodnota. U modulu z důvodu univerzálnosti jsou na obvod vyvedeny téměř všechny piny z procesoru, a poskládány tak aby se modul dal dále využívat jak k testovacím účelům, kde se modul při osazení všech pinů dá zasadit do nepájivého pole a tím dále testovat různé aplikace, tak aby mohl sloužit k již hotovým aplikacím, kde použité součástky postačují, nebo kde lze jednoduše rozšířit pomocí přídatného modulu.

4.5 Návrh a výroba desky plošných spojů

Plošný spoj pro modul byl navrhován v programu *Eagle* verze 7.2. Jelikož se jednalo o modul, který má mít co nejmenší spotřebu, kde byla možnost jej napájet z malé CR2032 baterie, realizace plošného spoje směřovala na co nejmenší rozměr, o trochu větší než zmiňovaná baterie. Výsledná velikost byla mírně navýšena na 33x44mm, kde zbyl malý prostor na vyvedení všech vývodů procesoru EFM32G222F128 na okraj desky modulu takovým způsobem aby sloužily k dalšímu vývoji jako i případný vývojový modul. Při osazení obvodových pinů lze modul zasadit do nepájivého kontaktního pole a dále využívat jako přípravek na další projekty. Jelikož obsahuje CPU, převodník USB sériová linka CP2104, všechny vývody, slouží modul jako výborný startovací pomůcka pro nejrůznější aplikace kde upřednostníme jak výkon, tak i spotřebu.

4.6 Spotřeba senzorového modulu

Jedním z hlavních požadavků při řešení práce bylo dát velký důraz na spotřebu celého zařízení. Proto byly použité dané součástky, které se vyznačovali co nejmenší spotřebou, schéma bylo konstrukčně realizováno a optimalizováno také co nejúsporněji, ale to nejdůležitější byl kód programu, který vše ovlivňuje. Hlavním principem šetření procesorů EFM je, co není používáno, to vypnout. Dále k běhu programu, program většinu času prospí, pokud je potřeba něco provést, na chvíli se procesor probudí z hlubokého spánku, provede výpočet, a zase usne. K tomu mu také napomáhají inteligentní senzory, které pomocí svého vlastního nízko-příkonového procesoru probudí hlavní procesor a

předá mu důležitá data. Jako maximální odběr celého modulu bylo určeno $20\mu\text{A}$ v režimu EM2. V tabulce 4-1 je rozpis spotřeb jednotlivých komponent modulu.

4-1 Spotřeba komponent modulu

Název komponenty	spotřeba v EM2 úsporný režim	Spotřeba v EM0 režim měření
EFM32G222F128	$1\mu\text{A}$	$240\mu\text{A}$
MMA8451Q	$4\mu\text{A}$	$6\text{-}120\mu\text{A}$
CP2104	$1\mu\text{A}$	$50\mu\text{A}^*$

*převodník není používán při běžném provozu a je napájen z USB

4.6.1 Spotřeba podle druhu použití

Hodnota spotřeby elektrické energie je ovlivněna podle četnosti čtení dat. Jiné nastavení akcelerometru použijeme například při detekci nárazu vozidla do překážky za účelem spuštění airbagů a jiné nastavení při zjištění, zda s předmětem je jakkoli pohybováno. V Tab. 4-1 je proveden teoretický výpočet pomocí aplikace eABattery pro procesory rodiny EFM32. Je tu spočteno několik variant detekce pohybu předmětu pomocí akcelerometru MMA8451.

Tab. 4-1 Celková spotřeba sensorového modulu v závislosti na použitém režimu a četnosti čtení dat z akcelerometru (při HFRCO 1MHz, délka měření vzorku 80ms)

varianta	stručný popis	délka mezi měření [ms]	přechod active [ms]	přechod stand-by [ms]	čtení z akcel. [ms]	životnost baterie [rok-den]	průměrná spotřeba [μA]
A	CPU v EM2 na stanovenou dobu - 1μA MMA8451 vypnuto, zapne se jen na měření MMA8451 inicializace - 1mA, 500μs MMA8451 měření - 6μA	500	42	-	3,3	0-354	25,50
		1.000	42	-	3,3	1-272	14,09
		2.000	42	-	3,3	3-47	7,74
		5.000	42	-	3,3	6-63	3,79
		10.000	42	-	3,3	9-76	2,45
B	CPU v EM2 na stanovenou dobu - 1μA MMA8451 pohotovostní stav 4μA MMA8451 měření - 6μA	500	3,3	3,3	3,3	2-97	10,79
		1.000	3,3	3,3	3,3	3-11	8,00
		2.000	3,3	3,3	3,3	3-240	6,58
		5.000	3,3	3,3	3,3	4-65	5,72
		10.000	3,3	3,3	3,3	4-142	5,44
C	CPU v EM2 na stanovenou dobu - 1μA MMA8451 stále měří, spotřeba 6μA	500	-	-	3,3	2-252	9,04
		1.000	-	-	3,3	2-361	8,11
		2.000	-	-	3,3	3-60	7,65
		5.000	-	-	3,3	3-103	7,37
		10.000	-	-	3,3	3-118	7,27
D	CPU v EM2 stále, čeká na INT od MMA8451	80	-	-	-	3-151	7,81

Varianta *A* počítá s tím, že procesor EFM32 je na časový úsek 500-10.000ms v energetickém režimu EM2, jeho spotřeba je pod 1 μ A a akcelerometr je zcela odpojen. Při měření v časových intervalech je CPU probuzen do EM0, jeho spotřeba stoupne na 292 μ A, dojde k připojení (spotřeba na 500 μ s stoupne na 1mA) a inicializaci akcelerometru přes pin GPIO procesoru (inicializace 42ms), a poté probíhá měření vzorku 80ms (CPU v EM2) a jako poslední přečtení hodnot 3,3ms při celkové spotřebě 300 μ A. Celkové spotřeby modulu pro jednotlivé časové intervaly jsou uvedeny v Tab. 4-1.

Ve variantě *B* je akcelerometr probuzen z pohotovostního režimu (Akc.4 μ A, CPU 1 μ A) do aktivního režimu (Akc.6 μ A, CPU 292 μ A) na dobu 3,3ms, poté procesor usne do EM2 na 80ms (měření vzorku), nakonec znovu přečtení hodnot z akcelerometru a pohotovostní režim (6,6ms - 300 μ A). Z Tab. 4-1 je patrné, že do 2000ms pauzy mezi měřeními je tato varianta výhodnější než předchozí.

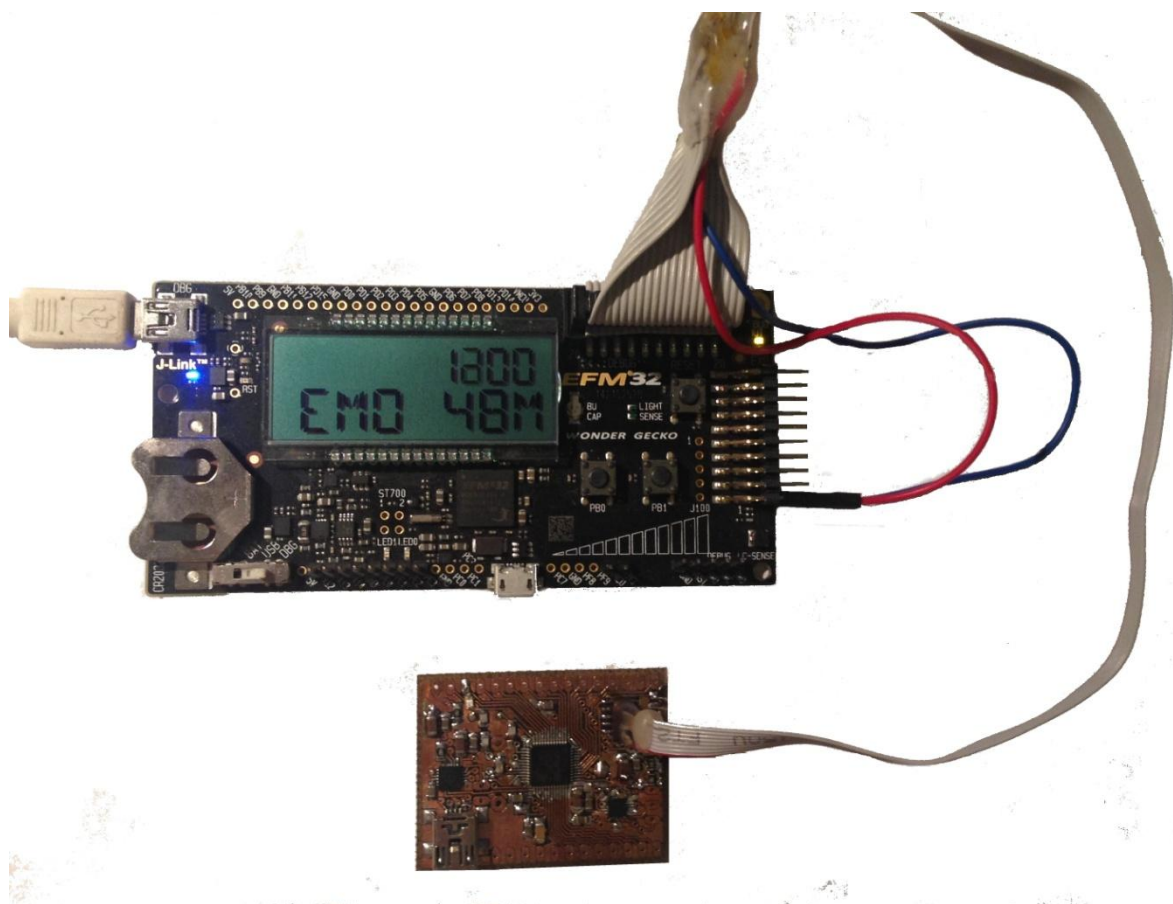
Třetí možností *C* je akcelerometr nechat měřit stále (spotřeba 6 μ A), pouze uspat CPU, při probuzení procesoru a čtení dat nám stačí 3,3ms (vynecháno je přepnutí akcelerometru do aktivního modu a zpět do pohotovostního režimu).

Poslední popisovanou variantou *D* je využití přerušení od akcelerometru, ten v případě detekování pohybu probudí procesor pomocí pinu INT viz Obr. 3-6, ten následně zpracuje informaci. Pokud ale nebude přeprogramovaná funkce v akcelerometru vyhovovat, a bude třeba probouzet procesor na jiný typ dat, tato varianta nelze použít. Spotřeba po celou dobu je konstantní (6 μ A akcelerometr a 1 μ A CPU).

Vhodnost výběru vhodné varianty závisí na parametrech cílové aplikace, např. velikost hlídaného předmětu, max. rychlost hlídaného předmětu, zdroj napájení atd.

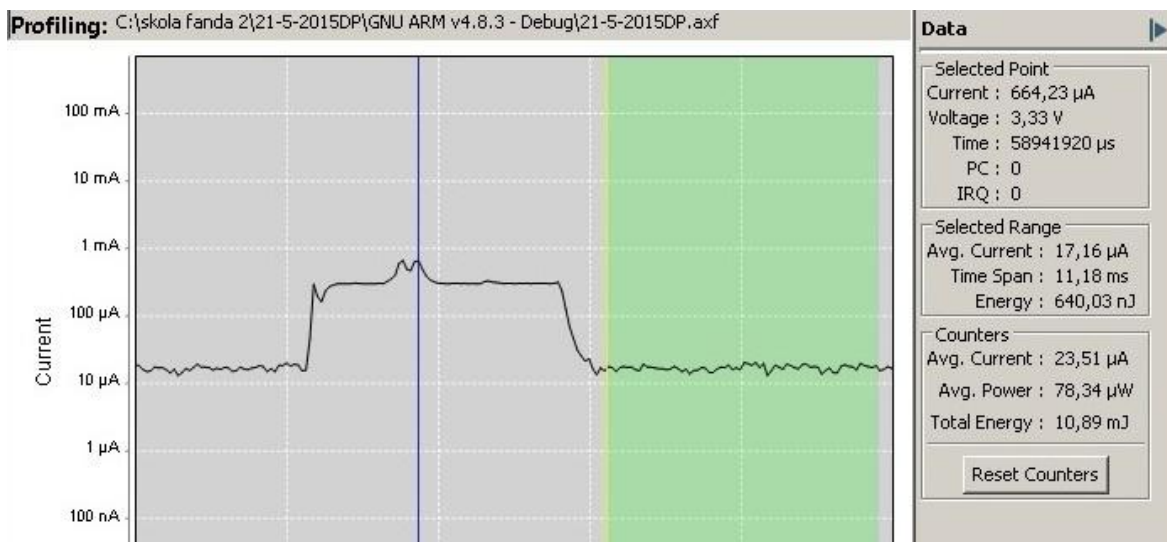
4.6.2 Reálné měření senzorového modulu

Aplikace Simplicity studio, která slouží k obsluze procesorů EFM32 obsahuje výborného pomocníka *energyAware Profiler*, který pomůže monitorovat a následně pomocí něj lze dosáhnout úpravou kódu nižší spotřeby vyvíjeného přípravku. Připojení vývojového prostředku s cílovou aplikací je patrné z Obr. 4-7, červený a modrý drát slouží k napájení cílové aplikace a slouží k monitorování spotřeby.



Obr. 4-7 Připojení DEBUG konektoru vývojového modulu k vyvíjené aplikaci

EnergyAware Profiler zobrazí celkovou spotřebu jak vývojového přípravku, tak i vyvíjené aplikace proto je nutné před měřením přepnout modul do režimu EM4 kdy klesne spotřeba na 20nA a tím měřenou aplikaci již lze měřit. Před měřením je nutno odpojit *DEBUG* konektor **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** protože monitorovací vodiče *SWD* odebírají část proudu což měření zkresluje o cca 16-17 μ A viz Obr. 4-8.



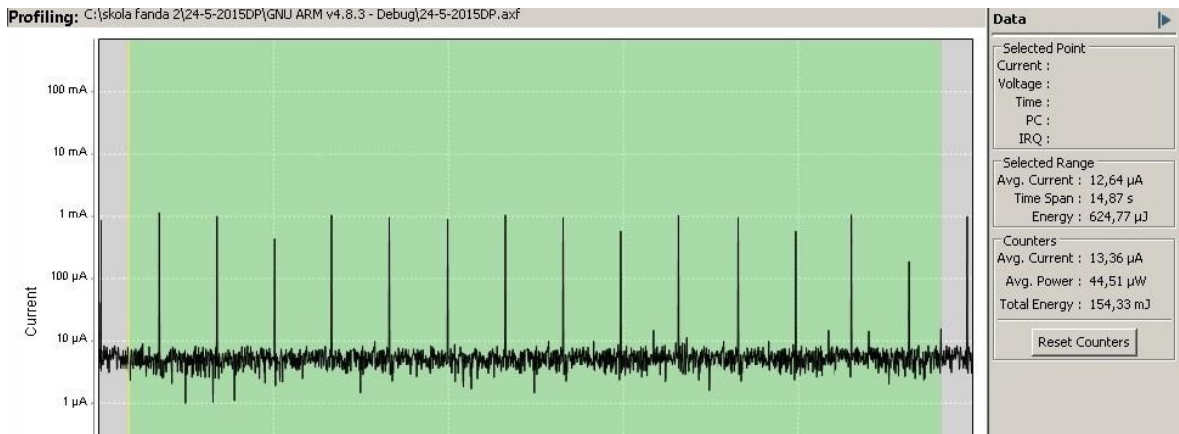
Obr. 4-8 Zvýšená spotřeba procesoru EFM32 zkršená vlivem zapojení DEBUG konektoru 16-17µA, (označená zeleně)

V tabulce Tab. 4-2 jsou srovnány metody měření pro varianty C a D provedené teoretickým výpočtem pomocí aplikace eABattery, a dále změřené na vyrobeném senzorickém modulu multimetrem METEX M-3270D a aplikací Energy Profiler, která měří pomocí pinu vývojového modulu až do 50mA.

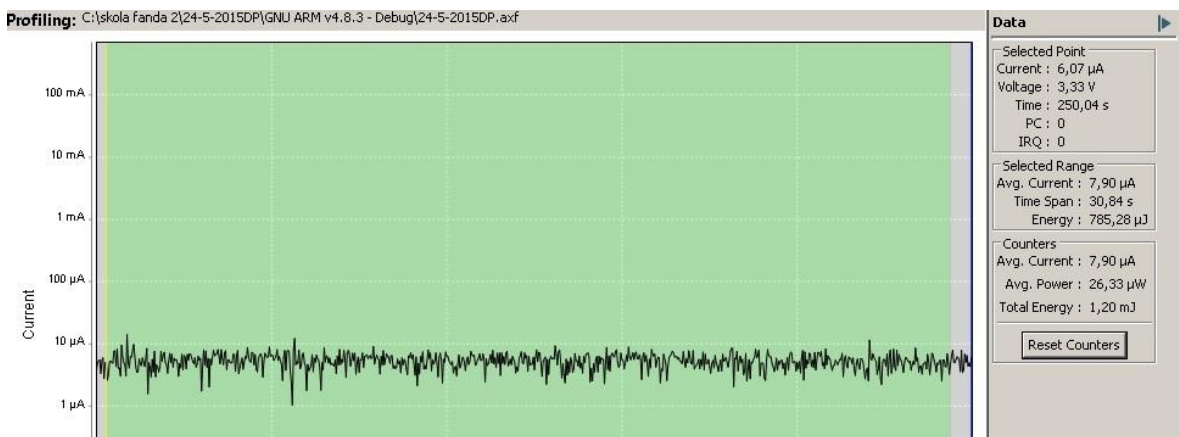
Tab. 4-2 Praktické měření průměrné spotřeby energie hotového senzorového modulu

varianta	eABattery [µA]	Multimetr METEX M-3270D [µA]	Energy Profiler [µA]
C	8,11	14,2	12,64
D	7,81	7,8	7,90

Na dalších obrázcích Obr. 4-9 a Obr. 4-10 jsou zobrazeny grafy z měření pomocí programu *Energy Profiler*.



Obr. 4-9 Varianta C, ODR MMA8451 aktivní režim, ODR 12,5Hz, perioda 80ms, CPU čte data interval 1s, jinak EM2, spotřeba modulu změřená pomocí *Energy Profiler*



Obr. 4-10 Varianta D, MMA8451 aktivní režim, ODR 12,5Hz, perioda 80ms, CPU v EM2, spotřeba modulu změřená pomocí *Energy Profiler*

5 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo zmapování nejnovějších MEMS akcelerometrů z hlediska spotřeby, prostudování detekce pohybu. Dalším cílem práce byl návrh a implementace zařízení pro indikaci události pohybu s důrazem na optimalizaci spotřeby. Jeden z výsledků byl výběr vhodného řídicího mikroprocesoru řady EFM32, který je navrhovaný pro nízkoenergetické aplikace. Pro měření akcelerace je použit senzor MMA8451Q, který se vyznačuje velmi nízkou spotřebou energie. Celé zařízení napájí lithiová baterie CP2032, která dokáže poskytovat energii po dobu několika let za předpokladu nastavení parametru detekce pohybu jednou za sekundu.

Senzorový modul snímá změnu statické akcelerace v krátkých časových úsecích, a pokud dojde k odchylce větší, než nastavená hodnota, procesor vyhodnotí událost jako pohyb. Jelikož kladena důležitost byla na co nejmenší spotřebu, nevyužilo se funkcí moderních akcelerometrů probouzet připojený procesor ze spánku pouze tehdy, kdy dojde k detekci pohybu. V závěru práce je porovnáno několik variant získávání dat a akcelerometru. Každá z nich najde uplatnění pro jiný účel detekce pohybu a o vhodnosti použití konkrétní varianty rozhodne cílová aplikace.

Obohacující přínos diplomové práce je hlubší zkušenost programování v jazyce C, prohloubení znalosti v návrhu oboustranných plošných spojů, poznání moderních mikroprocesorů řady EFM32, které jsou velmi šetrné a zároveň velmi výkonné. Při tvorbě programu pro budoucí modul bylo nutné se seznámit s vývojovým prostředím Simplicity Studio. Přes testování vzorových příkladů se získávali zkušenosti s ovládáním základních periférií, ale i ovládání samotného programu, používání základních knihoven, které jsou většinou dynamicky linkovány do každého projektu. V praktické části se podařilo získat zkušenosti s osazováním a pájením pouzder QFN, přínosné bylo použití logického analyzátoru při měření senzorového modulu pro detailní zobrazení průběhu signálu.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Principy akcelerometrů, Antonín Vojáček. [Online] 14. 1 2007. [Citace: 5. 3 2015.] www.automatizace.hw.cz/clanek/2007011401.
- [2] Tamás Pál, Milan Šimek, Martin Leixner, Ľubomír Mráz, Dominik Kováč. Získavanie energie a optimalizácia spotreby pre energicky sebestačné senzorické zariadenia. [Online] 20. 12 2014. [Citace: 5. 4 2015.] elektrorevue.cz/cz/download/ziskavanie-energie-a-optimalizacia-spotreby-pre-energicky-sebestacne-senzoricke-zariadenia--energy-harvesting-and-power-consumtion-optimization-for-energy-stand-alone-sensor-nodes-/.
- [3] Vojáček, Antonín. Integrované MEMS GYROSKOPY. [Online] 11. 10 2009. [Citace: 22. 3 2015.] <http://www.automatizace.hw.cz/integrované-mems-gyroskopy>.
- [4] MEMS - díl 1. - Co to je a jak to vypadá. [Online] 19. 11 2006. [Citace: 10. 5 2015.] www.hw.cz/clanek/2006111901.
- [5] MEMS and Nanotechnology Exchange, 1895 Preston White Drive, Suite 100. MEMS and Nanotechnology Exchange. [Online] [Citace: 5. 1 2015.] www.mems-exchange.org/MEMS/what-is.html.
- [6] Analog Devices. Digital MEMS Accelerometer ADXL343. [Online] 2. 2 2012. [Citace: 7. 3 2015.] www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADXL343.pdf.
- [7] KX022 Accelerometer Specifications - Kionix. [Online] 8. 1 2014. www.willow.co.uk/html/components/com_virtuemart/shop_image/product/OEM%20Component%20Level%20Accelerometers/pdfs/KX022-1020%20Specifications%20Rev4.0.pdf.
- [8] AN0027 - Application Note, Energy Optimization, Silicon Laboratories Inc. [Online] 25. 11 2013. [Citace: 22. 2 2015.] www.silabs.com/Support%20Documents/TechnicalDocs/AN0027.pdf.

- [9] AN0004: Clock Management Unit rev1.08 - Silicon Laboratories Inc. [Online] 25. 2 2014. [Citace: 7. 4 2015.]
www.silabs.com/Support%20Documents/TechnicalDocs/AN0004.pdf.
- [10] Freescale Semiconductor. Data Sheet: MMA8451Q [Rev.9] Freescale Semiconductor. [Online] 11 2014. [Citace: 15. 1 2015.]
www.freescale.com/files/sensors/doc/data_sheet/MMA8451Q.pdf.
- [11] USER MANUAL Starter Kit EFM32WG-STK3800 - Silicon Laboratories Inc. [Online] 10. 10 2013. [Citace: 1. 1 2015.]
www.silabs.com/Support%20Documents/TechnicalDocs/efm32wg-stk3800-ug.pdf.
- [12] Olejár, Martin. *Stručný popis sběrnice I2C a její praktické využití k připojení externí eeprom 24LC256 k mikrokontroléru PIC16F877*. [Online] 20. 5 2000. [Citace: 2. 1 2015.] www.hw.cz/navrh-obvodu/strucny-popis-sbernice-i2c-a-jeji-prakticke-vyuziti-k-pripojeni-externi-eeeprom-24lc256.
- [13] Manual CP2104 [Rev1.1] - Silicon Laboratories Inc. [Online] [Citace: 2. 2 2015.]
www.silabs.com/Support%20Documents/TechnicalDocs/cp2104.pdf.
- [14] Eagle - CadSoft. [Online] 16. 7 2014. [Citace: 3. 3 2015.]
<http://www.eagle.cz/freeware.htm>.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

<i>Značka</i>	<i>Veličina</i>	<i>Značka jednotky</i>
t	čas	s
C	elektrická kapacita	F
d	vzdálenost	m
F	frekvence	Hz
I	elektrický proud	A
p	tlak	Pa
P	výkon	W
M	modulační rychlost	Baud
U	elektrické napětí	V
g	tíhové zrychlení	m/s ²

AEM	Advanced Energy Monitor
API	Application Programming Interface
ARM	Advanced RISC Machine, Acorn RISC Machine
A/D	Analog/Digital
ADC	Analog to Digital Converter
BOR	Brown Out Detector
BYP	Bypass Capacitor
CD	Compact Disc
CPU	Central Processing Unit
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
CMSIS	Cortex Microcontroller Software Interface Standard
DCO	Digitally Controlled Oscillator
DMA	Direct Memory Access
DNC	Do Not Connect to anything, leave pin isolated and floating
DSP	Digital Signal Processing
DPS	Deska Plošného Spoje
EA	Events Active
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
EM	Energy Mode
ESD	Electrostatic Discharge
GPIO	General-Purpose Input / Output
GND	Connect to Ground

GUI	Graphical User Interface
HDD	Hard Disk Drive
HPF	High Pass Filtered
I ² C	Inter-Integrated Circuit
I/O	Input / Output
IDE	Integrated Development Environment
IRQ	Interrupt Request
ISP	In System Programming
JTAG	Join Test Action Group
OS	Operating System
PCB	Printed Circuit Board
PC	Personal Computer
POR	Power On Reset
PU	Portrait
LED	Light-Emitting Diode
LCD	Liquid Crystal Display
LDO	Low Dropout
LEUART	Low Energy Universal Asynchronous Receiver/Transmitter
MEMS	Micro Electro Mechanical Systems
MCU	Microcontroller Unit
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
MIJMPS	Multi User MEMS Process

MSPS	Million Sample Per Second
NAND	Negated AND, Not AND
NC	Not Connected
RAM	Random Access Memory
ROM	Read-Only Memory
RC	Resistor Capacitor
RISC	Reduced Instruction Set Computing
RTC	Real-Time Clock
SD	Secure Digital
SDA	Serial Data
SCL	Serial Clock
SoC	System on Chip
SMD	Surface Mount Device
SRAM	Static Random-Access Memory
TTL	Transistor–Transistor Logic
TWI	Two Wire Interface
UART	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter
USART	Universal Synchronous/Asynchronous Receiver/Transmitter
USB	Universal Serial Bus
VDD	Power Supply
VDDIO	Internal Power Supply

SEZNAM PŘÍLOH

A Návrh zařízení

- A.1 Obvodové zapojení
- A.2 Deska plošného spoje – top (strana součástek)
- A.3 Deska plošného spoje – bottom (strana spojů)

B Fotografie

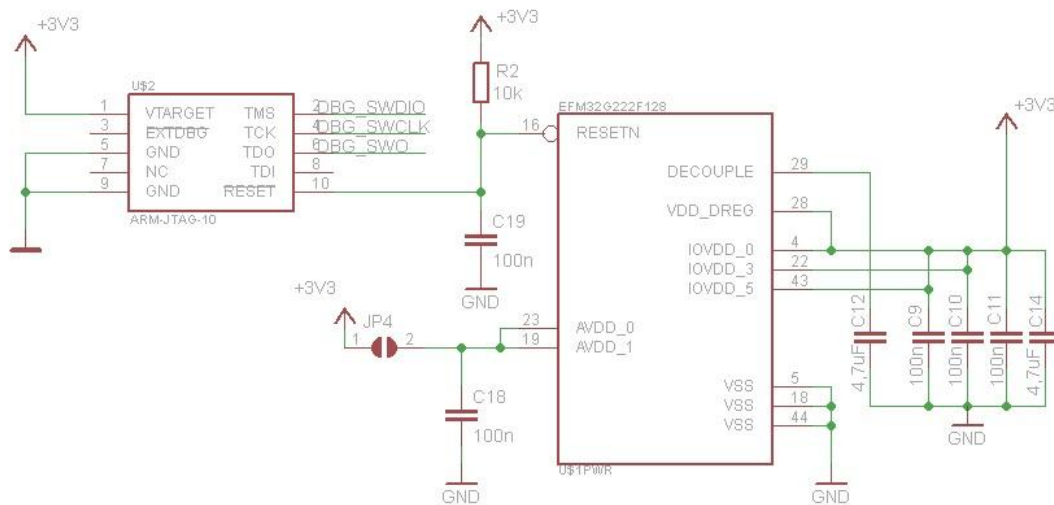
- B.1 Fotografie měření
- B.2 Fotografie přístrojů

C Seznam součástek

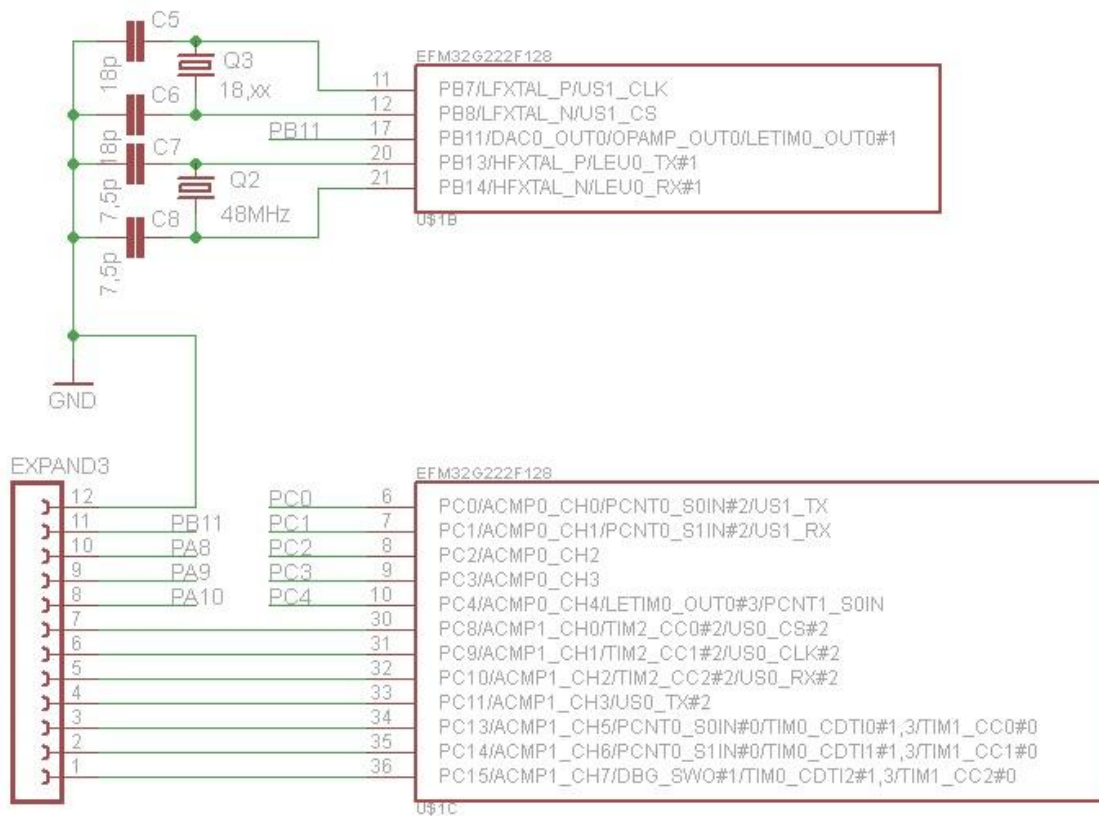
Obsah přiloženého CD

A NÁVRH ZAŘÍZENÍ

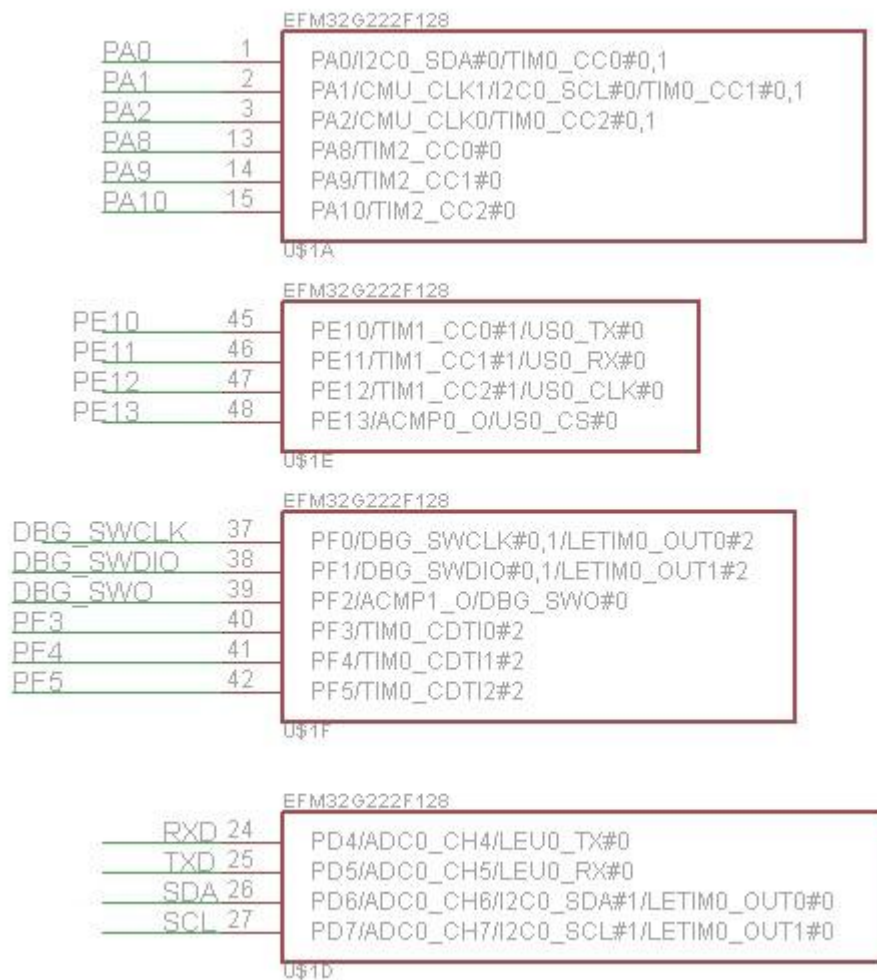
A.1 Obvodové zapojení



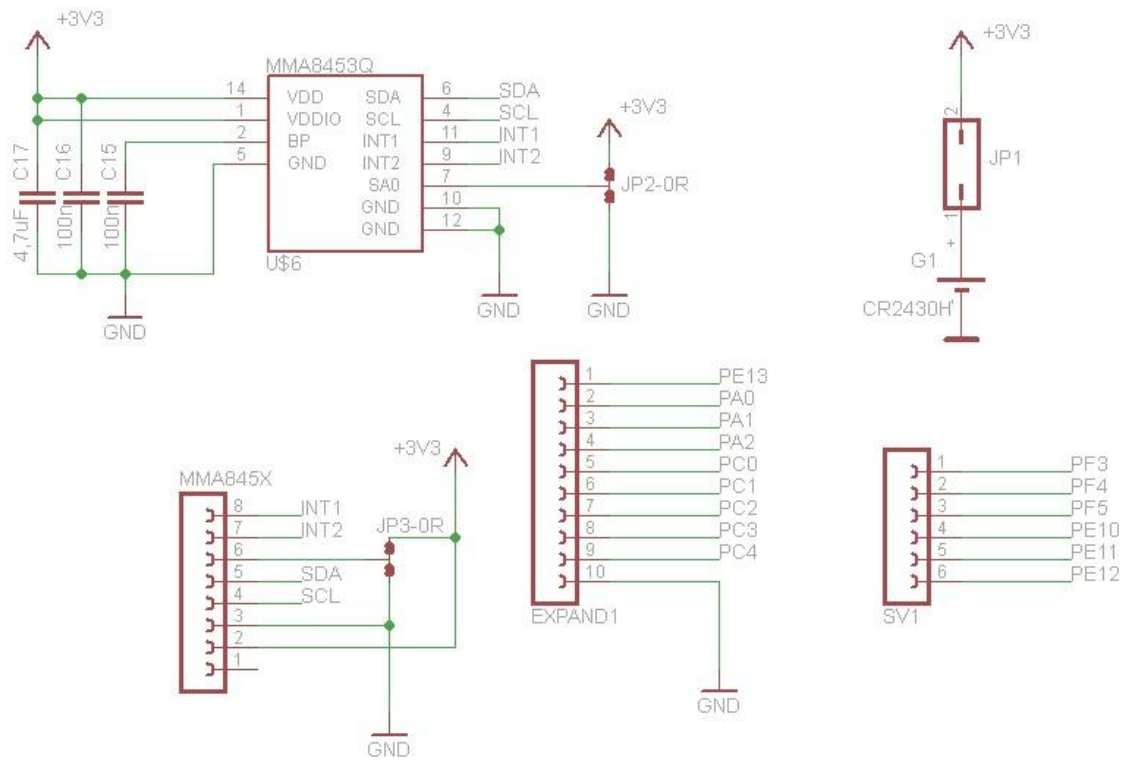
Obr. 0-1 Schéma zapojení senzorného modulu (CPU, JTAG Debug konektor)



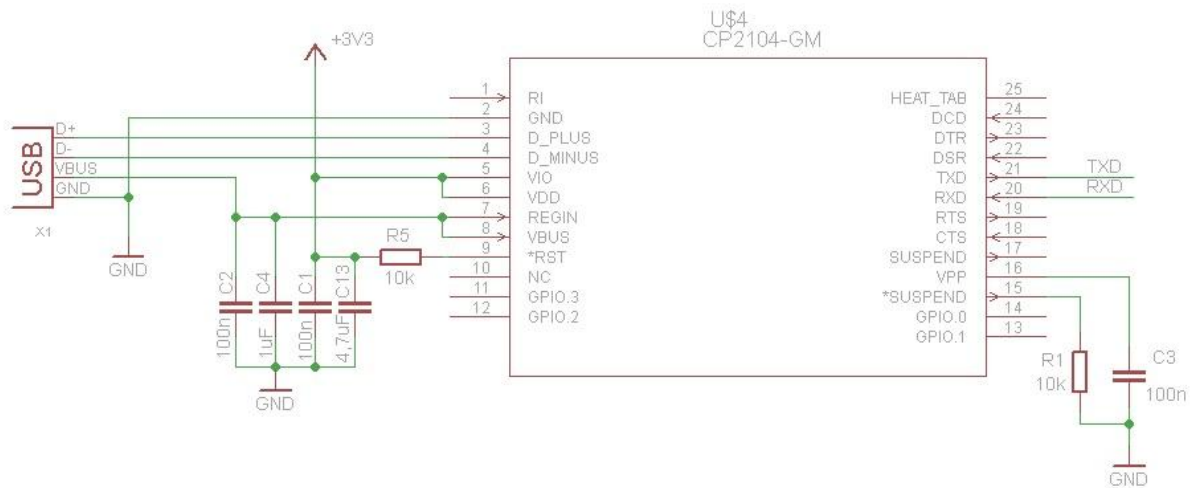
Obr. 0-2 Schéma zapojení senzorného modulu (Expand konektor, krystaly, GPIO)



Obr. 0-3 Schéma zapojení sensorového modulu (výstupy CPU EFM32G222F128)

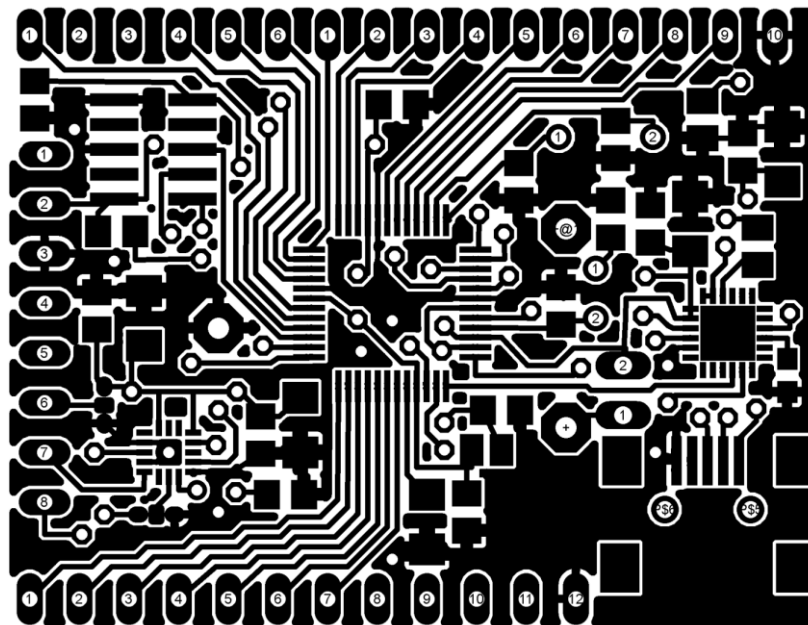


Obr. 0-4 Schéma zapojení senzoru MMA8451Q, baterie, rozšiřující konektory)



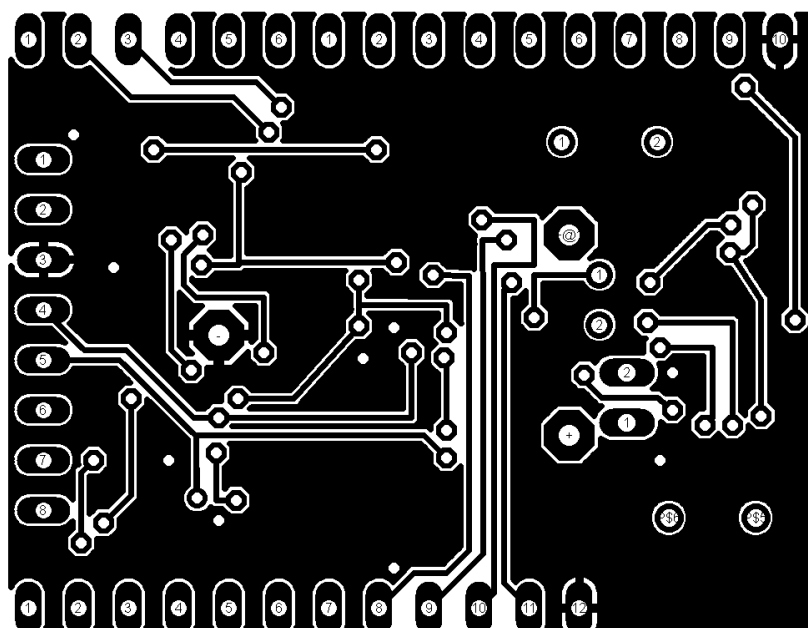
Obr. 0-5 Schéma zapojení USB převodníku CP2104

A.2 Deska plošného spoje – top (strana součástek)



Obr. 0-6 Rozměr desky 33 x 44 [mm], měřítko M2:1

A.2 Deska plošného spoje – bottom (strana spojů)



Obr. 0-7 Rozměr desky 33 x 44 [mm], měřítko M2:1

C FOTOGRAFIE

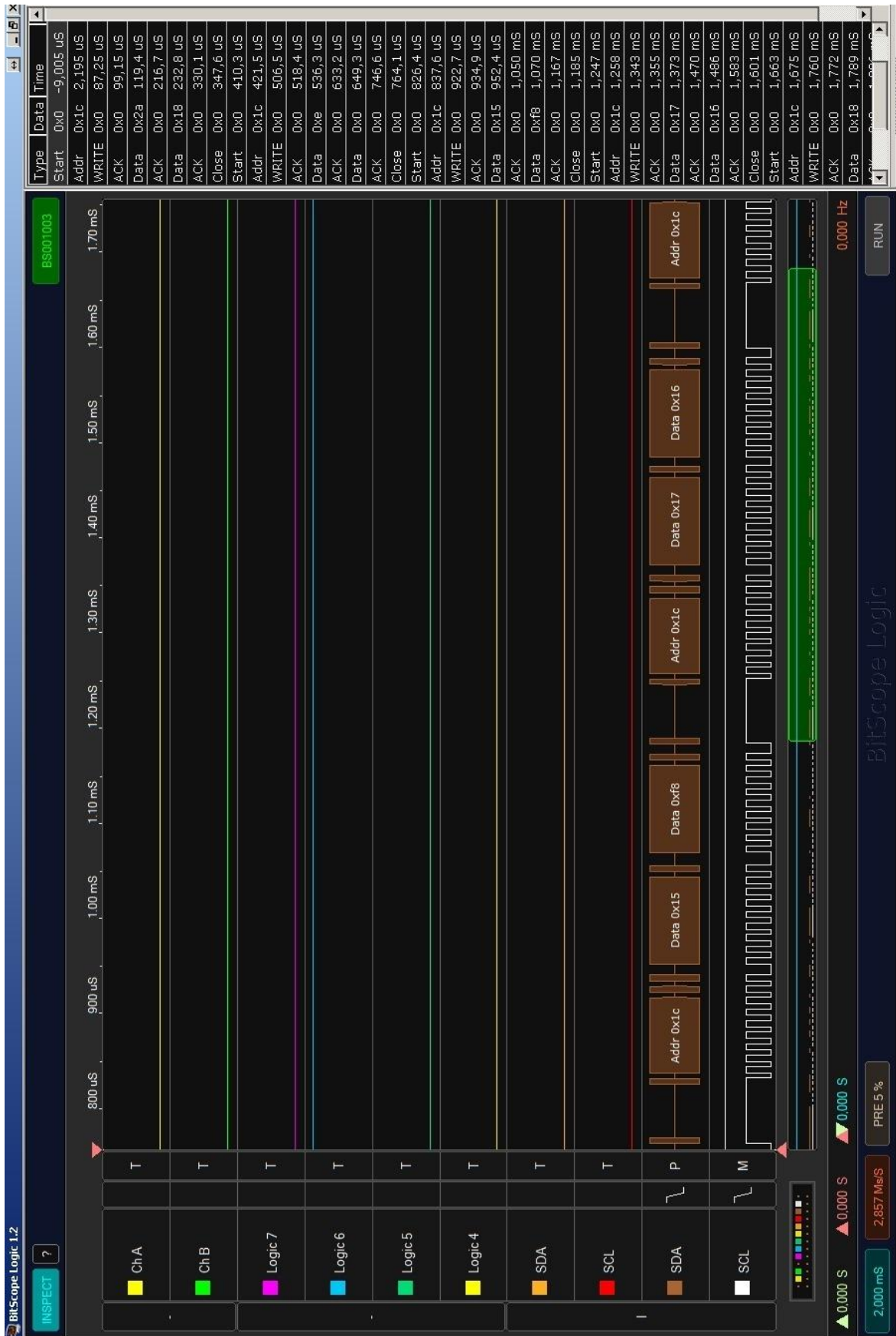
C.1 Fotografie měření



Obr. 0-8 Měření průměrné spotřeby energie senzového modulu pomocí měřicího přístroje METEX měření varianty D

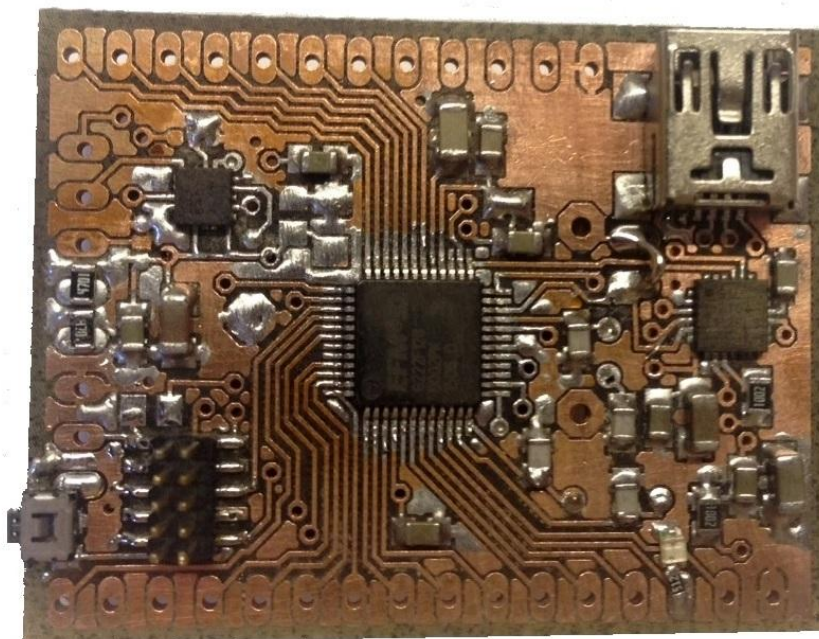


Obr. 0-9 Zobrazení varianty A a varianty C v programu eABattery

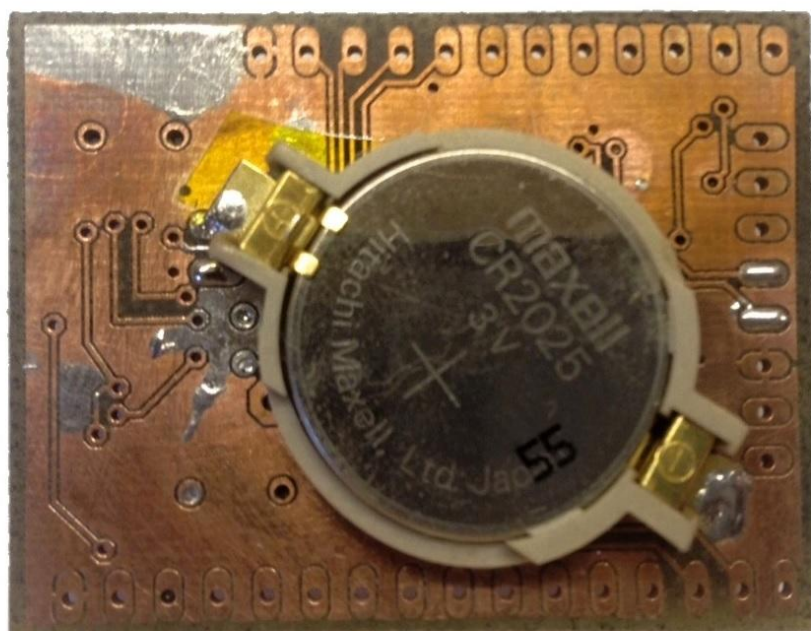


Obr. 0-10 Zobrazení komunikace I²C v programu *Bitscope*

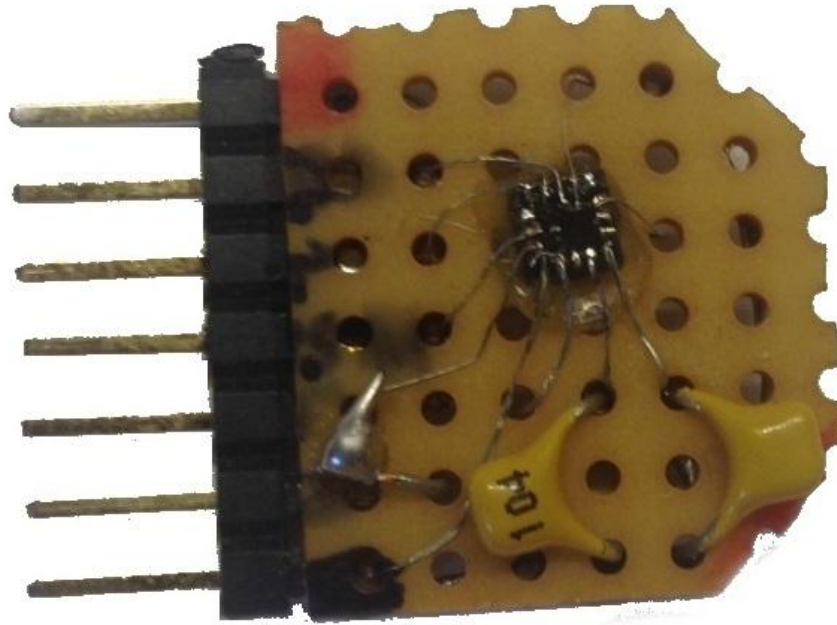
C.2 Fotografie přístrojů



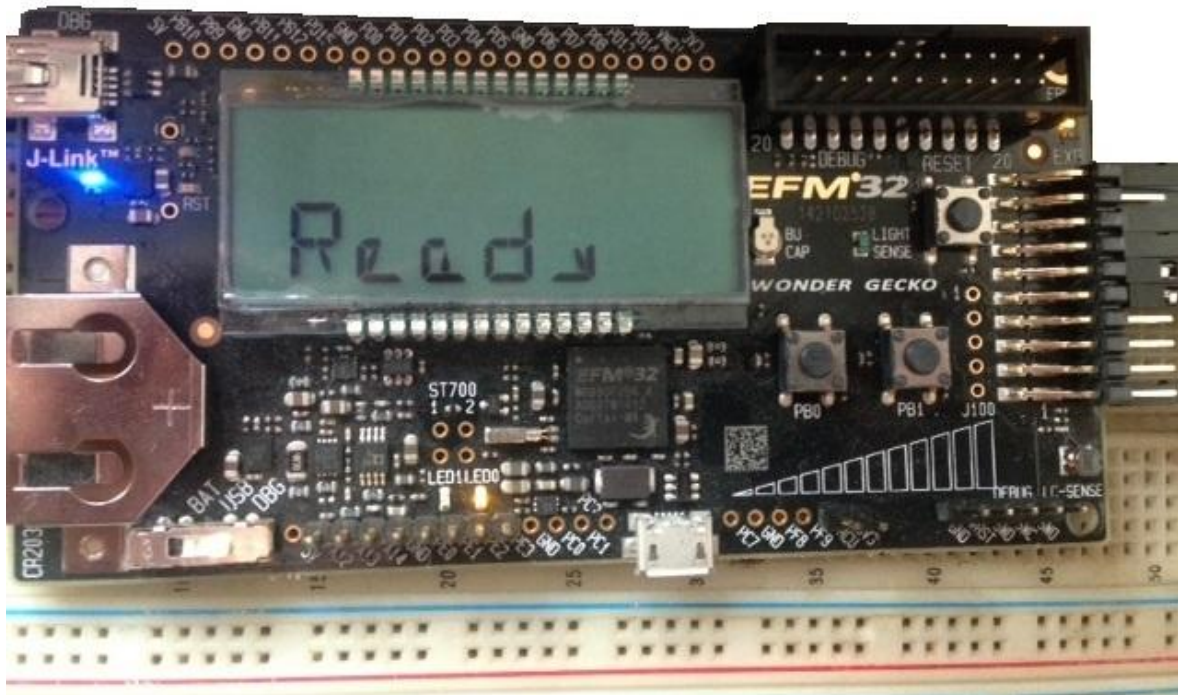
Obr. 0-11 Senzorový modul – strana součástek



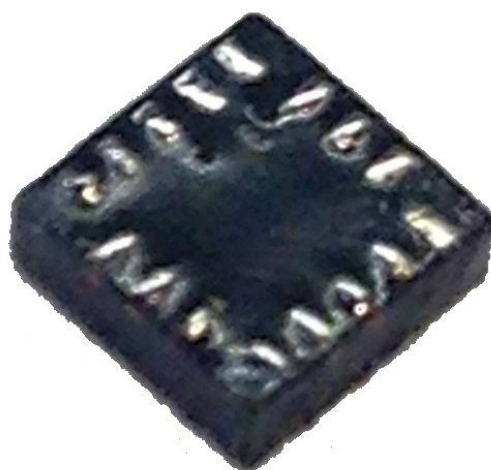
Obr. 0-12 Senzorový modul – strana baterie



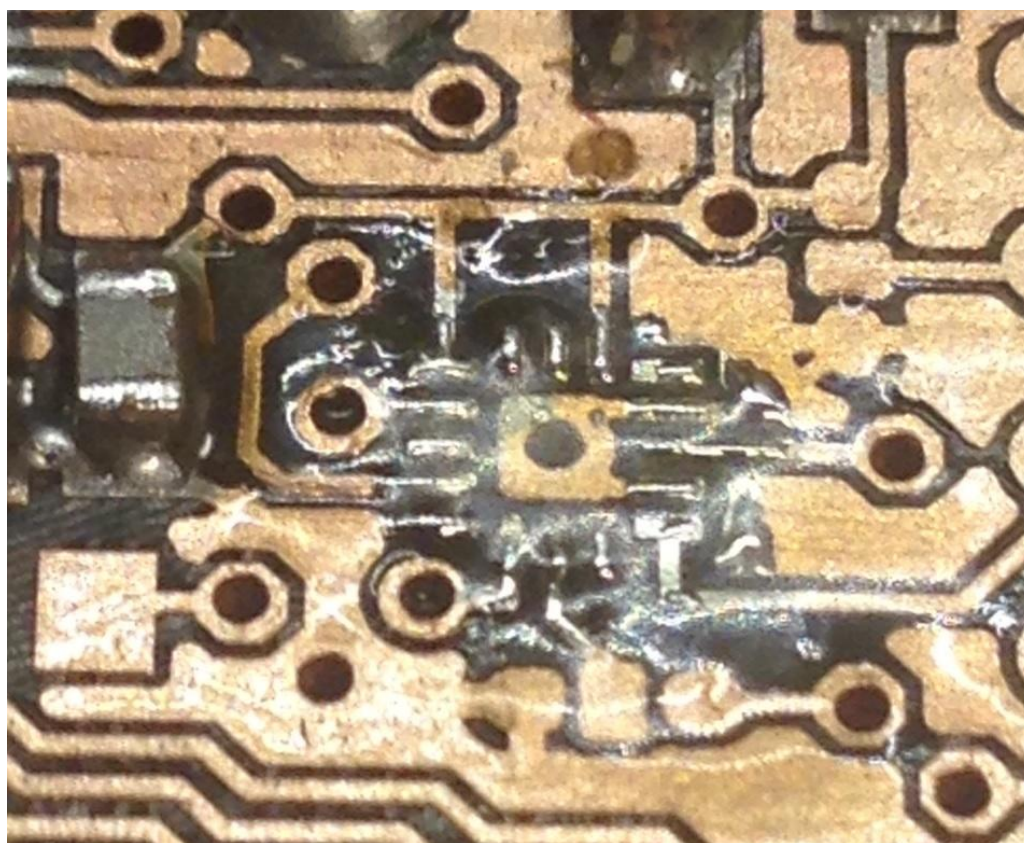
Obr. 0-13 Prototyp akcelerometru MMA8451Q na univerzální DPS



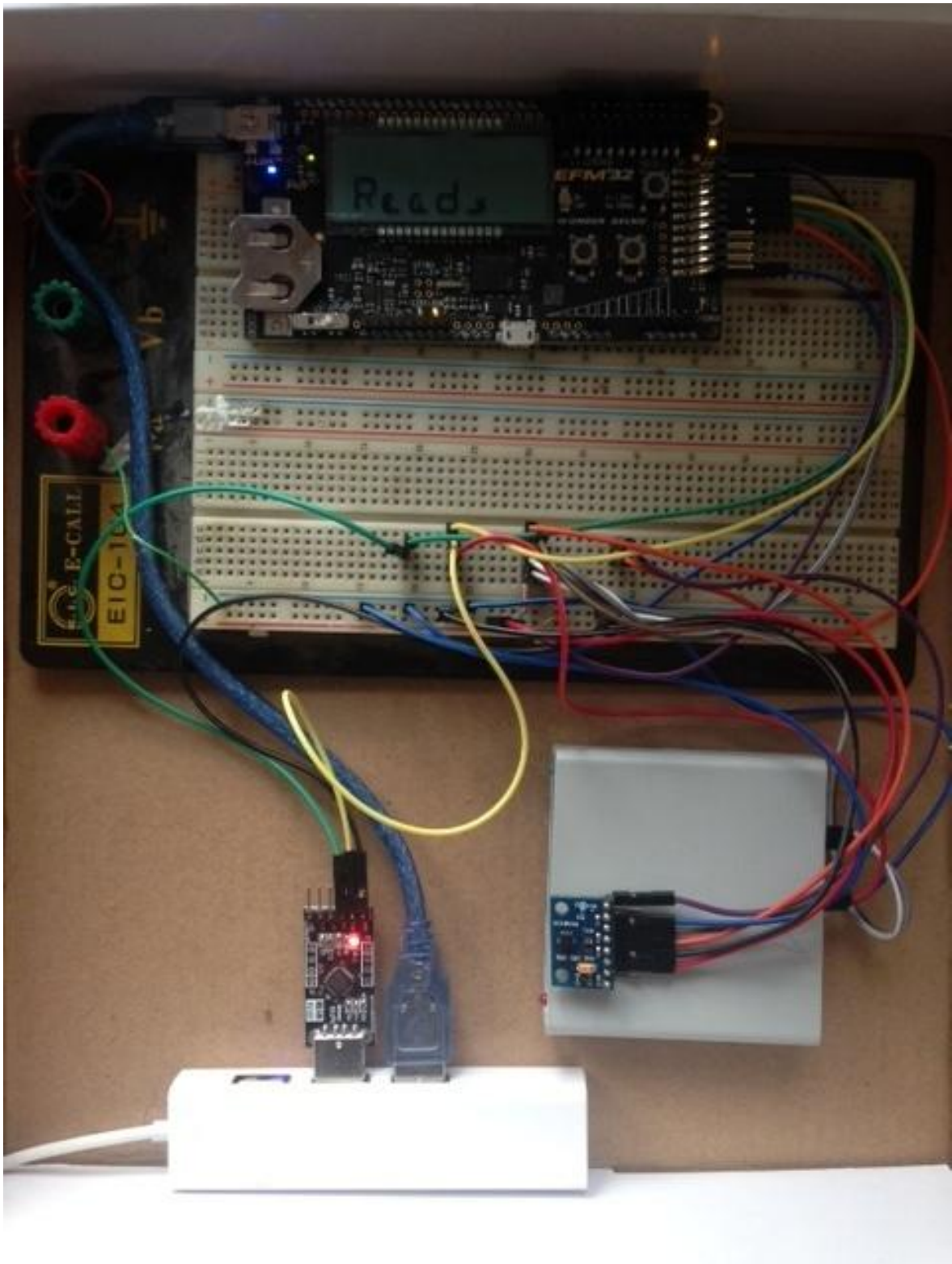
Obr. 0-14 Vývojový modul WONDER GECKO



Obr. 0-15 Připravený akcelerometr MMA8451 před montáží na DPS,
16pin QFN 3mm x 3mm x 1mm



Obr. 0-16 DPS senzorové desky před osazením akcelerometru MMA8451



Obr. 0-17 Pohled na testovací sestavu

D SEZNAM SOUČÁSTEK

Označení	Hodnota	Pouzdro
C1	100n	C0805
C2	100n	C0805
C3	100n	C0805
C4	1uF	C1206
C5	18p	C0805
C6	18p	C0805
C7	7,5p	C0805
C8	7,5p	C0805
C9	100n	C0805
C10	100n	C0805
C11	100n	C0805
C12	4,7uF	C1206
C13	4,7uF	C1206
C14	4,7uF	C1206
C15	100n	C0805
C16	100n	C0805
C17	4,7uF	C1206
C18	100n	C0805
C19	100n	C0805
EXPAND1	-	FE10
EXPAND2	-	FE06
EXPAND3	-	FE12
JP1	-	Jumper
JP2	-	C0R-JMP
JP3	-	C0R-JMP
JP4	-	SJ
U1	EFM32G222F128	QFP48
U2	ARM-JTAG-10	2X5PIN_1.27
U3	MMA8453Q	16 PIN QFN
U4	CP2104	QFN24_4X4
Q1	48MHz	HC49U-V
Q2	32,768kHz	TC26H

E OBSAH PŘILOŽENÉHO CD

- Diplomová práce v elektronické podobě
- Návrh sensorového modulu v programu *Eagle v 7.2.0*
- Projekt napsaný ve vývojovém prostředí *Simplicity Studio*
- Technická dokumentace použitých součástek
- Hex soubor inportovatelný do *AMR CPU*