



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

VYUŽITÍ 8X8 LED MATICE A MEMS SENZORU PRO PROPAGAČNÍ ÚČELY

USE 8X8 LED MATRIX AND MEMS SENSOR FOR PROMOTIONAL PURPOSES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JAKUB STŘEDA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. DANIEL ZUTH, PH.D.

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automatizace a informatiky

Akademický rok: 2014/15

ZADÁNÍ BAKALÁRSKÉ PRÁCE

student(ka): Jakub Středa

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Aplikovaná informatika a řízení (3902R001)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Využití 8x8 LED matice a MEMS senzoru pro propagační účely

v anglickém jazyce:

Use 8x8 LED Matrix and MEMS Sensor for Promotional Purposes

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se bude zabývat vytvořením demonstrační úlohy s využitím 8x8 LED maticí a MEMS senzoru. Jako řídicí jednotka bude využit mikrokontrolér řady ATmega. Jednou z vhodných úloh bude simulace hrací kostky s využitím akcelerometru. Práce je součástí projektu Aplikovaná informatika a řízení FSI-S-14-2533.

Cíle bakalářské práce:

1. Popište ovládání 8x8 LED matice s řadičem
2. Vyberte a popište vhodný MEMS senzor
3. Otestujte použité prvky s vhodným mikrokontrolérem
4. Vytvořte ukázkové aplikace včetně simulace hrací kostky

Seznam odborné literatury:

MATOUŠEK, David. Práce s mikrokontroléry ATMEL AVR . 2. vyd. Praha: BEN, 2006, 375 s. ISBN 80-730-0209-4.

MANN, Burkhard. C pro mikrokontroléry: ANSI-C, kompilátory C, spojovací programy - linkery, práce s ATMEL AVR a MSC-51, příklady programování v jazyce C, nástroje pro programování, tipy a triky. Vyd. 1. Praha: BEN, 2003, 279 s. ISBN 80-730-0077-6.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Daniel Zuth, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/15.

V Brně, dne 29.11.2014

L.S.

Ing. Jan Roupec, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan

ABSTRAKT

Hlavním cílem této bakalářské práce je vytvoření ukázkové aplikace pro propagační účely. Jedná se o využití mikrokontroléru ATmega32A, MEMS snímače zrychlení a úhlové rychlosti a 8x8 LED matice s řadičem. Práce je v teoretické části zaměřena na charakteristiku použitých součástek, jejich vlastností a způsobu řízení. Následně se práce zabývá napájením, návrhem a výrobou desky plošných spojů pro mikrokontrolér a v poslední části práce je pozornost věnována softwaru mikrokontroléru a výrobě pouzdra.

ABSTRACT

The main objective of this bachelor thesis is to create exemplary application for promotional purposes. It means using of a microcontroller ATmega32A, a MEMS acceleration and angular velocity sensor and a LED matrix with a driver.. In the theoretical part the thesis is focused on the characteristics of used components, their features and way of control. Subsequently, the thesis deals with a power supply, design and manufacture of a printed circuit board for microcontroller and the last part of the thesis is focused on a microcontroller's software and manufacture of a casing.

KLÍČOVÁ SLOVA

MEMS technologie, akcelerometr, gyroskop, řadič LED matice, mikrokontrolér, deska plošných spojů

KEYWORDS

MEMS technology, accelerometer, gyroscope, LED matrix driver, microcontroller, printed circuit board

PROHLÁŠENÍ O ORIGINALITĚ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně dle pokynů vedoucího a s použitím uvedené odborné literatury.

V Brně, dne 11. 5. 2015

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

STŘEDA, J. *Využití 8x8 LED matice a MEMS senzoru pro propagační účely*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 37 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Daniel Zuth, Ph.D..

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji svému vedoucímu práce Ing. Danielu Zuthovi, Ph.D. za jeho ochotu a čas při vytváření této práce. Za podporu bych dále rád poděkoval své rodině a blízkým.

OBSAH

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | ÚVOD | 11 |
| 2 | ROZBOR PROBLEMATIKY | 13 |
| 3 | HARDWAROVÉ PRVKY | 15 |
| 3.1 | MPU-6050 | 15 |
| 3.1.1 | MEMS technologie..... | 15 |
| 3.1.2 | Charakteristika..... | 15 |
| 3.1.3 | Sběrnice I ² C..... | 16 |
| 3.2 | 8x8 LED matice s řadičem MAX7219 | 17 |
| 3.2.1 | Charakteristika..... | 18 |
| 3.2.2 | Multiplexing | 18 |
| 3.2.3 | Sběrnice SPI | 20 |
| 3.3 | ATmega32A..... | 21 |
| 4 | REALIZACE | 23 |
| 4.1 | Požadavky..... | 23 |
| 4.2 | Vývoj | 23 |
| 4.3 | Napájení | 24 |
| 4.4 | DPS | 25 |
| 4.4.1 | Návrh a výroba | 25 |
| 4.5 | Program mikrokontroléru | 26 |
| 4.5.1 | MPU-6050 | 28 |
| 4.5.2 | LED matice..... | 28 |
| 4.5.3 | Pracovní režimy | 28 |
| 4.6 | Pouzdro | 29 |
| 4.7 | Sestavení | 30 |
| 5 | ZÁVĚR | 33 |
| | SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY | 35 |
| | SEZNAM PŘÍLOH | 37 |

1 ÚVOD

Činnost mnoha člověkem vytvořených strojů zahrnuje mechanický pohyb. Často je tento pohyb nebo polohu některých částí nutné snímat pro zajištění správné funkce či bezpečnosti. Senzory zrychlení a úhlové rychlosti jsou nedílnou součástí moderního průmyslu. Jejich využití sahá od průmyslových polohovacích zařízení, robotů a bezpečnostních systémů v automobilech po méně náročné aplikace jako například krokoměry.

V měřítku mikrosvětla faktory jako hmotnost a setrvačná síla ztrácejí na důležitosti oproti tření a povrchovému napětí. Miniaturní zařízení jsou schopná dosáhnout mnohem lepších dynamických vlastností než rozměrné stroje. Docílit vysoké preciznosti ve velkém měřítku bývá drahé a většinou i velmi složité při hromadné výrobě. Ve snaze vyhovět stále větším nárokům na rychlost a přesnost jsou vyráběny mikroskopické senzory o velikosti milimetrů až mikrometrů. Konkrétně se jedná o technologii MEMS (z ang. Micro Electro Mechanical Systems). Přínos této technologie je značný. Umožňuje vytvářet kompaktní elektromechanické součástky, které mohou být použity kupříkladu pro polohování, regulaci či filtraci. Využívají se například v telekomunikacích pro přepojování optických vláken pomocí miniaturních zrcadel. O výhodách této technologie svědčí i fakt, že NASA využívá MEMS mimo jiné pro gyroskopy a hmotnostní spektrometry [1].

Oblast automatizace se velice rychle rozvíjí. Každým dnem přibývají nové technologie a postupy. Pro udržení kroku se současným i budoucím trendem vývoje je tedy potřeba stále více odborníků na tuto problematiku. Důležitým úkolem je tedy přivést studenty ke studiu právě automatizačních oborů.

Cílem práce je, mimo nastudování a popsání potřebné teorie, vytvořit ukázkovou aplikaci, která bude demonstrovat možnosti MEMS technologie. Konkrétně se jedná o využití mikrokontroléru (MPU, z ang. Micro Processor Unit), MEMS snímače zrychlení a úhlové rychlosti ve třech osách a LED (z ang. Light-Emitting Diode) matice s řadičem.

Práce je v teoretické části zaměřena na charakteristiku hlavních součástí, které jsou použity. V jednotlivých kapitolách jsou popsány jejich vlastnosti, přiblíženy protokoly použitých sběrnic a způsob řízení. Experiment spočívá v návrhu a výrobě prototypu pro propagační účely pro Ústav Automatizace a Informatiky Fakulty strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně. Data ze senzoru jsou posílána ze snímače do MPU, zpracována dle uživatelem zvoleného programu a prezentována na LED matici. Řešení zahrnuje návrh a výrobu desky plošných spojů (DPS) a ochranného pouzdra, do kterého je výsledný sestavený modul implementován.

2 ROZBOR PROBLEMATIKY

Při snímání zrychlení lze měřit zrychlení dynamické, síla vzniklá změnou rychlosti pohybujícího se předmětu, a statické, síla vzniklá působení zemské přitažlivosti.

Princip senzorů zrychlení spočívá v měření pohybu seismické hmoty. V zásadě se využívá hlavně tří typů akcelerometrů: piezoelektrické, piezoodporové a kapacitní. Piezoelektrické akcelerometry snímají polohu seismické hmotnosti pomocí piezokrystalu. Vyhodnocováno je generované piezoelektrické napětí úměrné vyvolané kompresní či smykové deformaci. Tento typ však neumožňuje měření statického zrychlení. Piezoodporové (piezoresistivní) akcelerometry využívají závislosti změny ohmického odporu piezoodporového elementu na jeho deformaci. Pohybem seismické hmoty dochází k prodlužování nebo zkracování tenzometru a tudíž změně jeho elektrických vlastností. Kapacitní senzory zrychlení pracují na principu snímání kapacity kondenzátoru při změně vzdálenosti jeho elektrod způsobené pohybem seismické hmoty [2].

Klasické senzory úhlové rychlosti pracují na principu gyroskopu. Klasický gyroskop je tvořen rotujícím setrvačником. Většina hmotnosti je soustředěna dále od osy otáčení pro dosažení co největšího momentu setrvačnosti. Při natočení gyroskopu dojde k vibracím, které jsou způsobené Coriolisovým efektem. Tyto vibrace síly jsou poté měřeny a z údajů jsou určeny změny orientace [3].

V současné době se na trhu vyskytují senzory s analogovým nebo digitálním výstupem. Senzory s napěťovým výstupem reprezentují naměřené hodnoty pomocí úrovně výstupního napětí. Tato data musejí být poté digitalizována analogově-digitálním (A/D) převodníkem pro další zpracování. Hlavní nevýhodou je zatížení šumem. Malé výchyly mohou být pokládány za rušení. Každý analogový snímač musí být navíc připojen pomocí vlastních vodičů. Data ze senzoru s digitálním výstupem jsou prezentována přímo v binární podobě. Komunikace probíhá většinou po standardizované sběrnici, která umožňuje propojení mnoha senzorů s řídicí jednotkou na společných vodičích. Data je obvykle potřeba vhodně prezentovat.

Maticové LED displeje jsou díky použité technologii, která zaručuje nízké provozní náklady a vysokou spolehlivost, velmi rozšířené. V zásadě se různé modely liší převážně tím, zda je nebo není použit řadič. Signál pro LED matice musí být multiplexován, což znamená velmi rychlé přepínání jednotlivých řádků/sloupců tak, že v jeden okamžik mohou svítit LED jen v daném úseku. Této problematice se více věnuje kap. 3.2.2. LED matice bez řadiče je pouze pasivní periferií, do které je přiveden jeden vodič na každý řádek i sloupec z řídicí jednotky, v níž musí být řešen multiplexing softwarově. Toto vyžaduje mnoho pinů a v praxi se proto příliš nepoužívá. V případě řadiče je situace jiná. Řídicí člen posílá informace, jaké LED mají být rozsvíceny a případné další nastavení, řadiči, který tyto pokyny zpracovává a ovládá LED matici. Navíc je možné propojení mnoha LED matic, jelikož naprostá většina řadičů komunikuje po standardizovaných sběrnících.

Nedílnou součástí této práce je vytvoření desky plošných spojů (DPS). DPS mohou být jednostranné, což znamená, že veškeré vodivé spoje jsou umístěny pouze na jedné straně, oboustranné či vícevrstvé. Dále mohou být s prokovenými otvory, drážkované, frézované, povrchově cínované, aj. Způsobů jejich výroby je taktéž více. Proveditelné v domácích podmínkách jsou například ručně lihovým fixem, nažehlením toneru nebo fotocestou.

Profesionální průmyslové postupy jsou například osazování SMT (z ang. Surface Mount Technology) planžet či celoplošné galvanické zlacení.

Pro účely práce byl k dispozici digitální MEMS senzor akcelerace a úhlového zrychlení MPU-6050 a 8x8 LED matice s řadičem MAX7219. Řízení je realizováno pomocí mikrokontroléru ATmega32A.

3 HARDWAROVÉ PRVKY

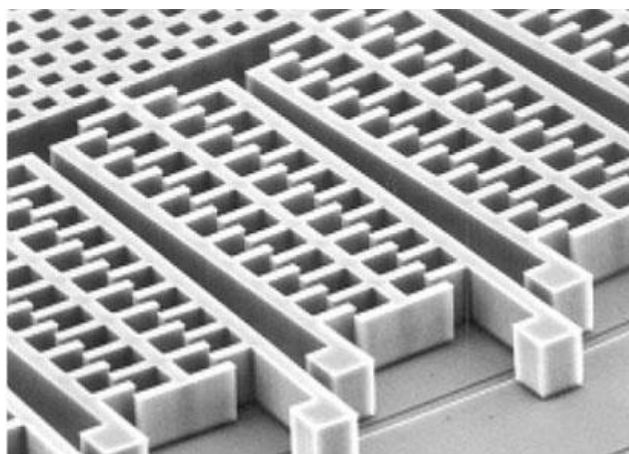
V této kapitole jsou představeny hlavní prvky, jimiž jsou digitální 3-osý MEMS senzor zrychlení a úhlové rychlosti MPU-6050, 8x8 LED matice s řadičem MAX7219 a mikrokontrolér ATmega32A.

3.1 MPU-6050

Senzor MPU-6050 kombinuje MEMS gyroskop a akcelerometr v jednom čipu. Jedná se o samostatný modul vyráběný firmou InvenSense.

3.1.1 MEMS technologie

Pojem MEMS znamená integraci a vzájemnou spolupráci mechanických struktur a elektrických obvodů (řídící i vyhodnocovací elektroniky) v jedné součástce. Jednotlivé části jsou většinou umístěny na silikonový substrát. Elektronické obvody jsou vyráběny stejnými technologiemi, jaké jsou použity při výrobě integrovaných obvodů, a pro tvorbu mechanických prvků jsou využívány postupy jako například selektivní leptání nebo implementování nových vrstev. Toto kompaktní řešení je vhodné zejména díky miniaturním rozměrům, vysoké odolnosti a nízkým cenám z důvodu menšího počtu výrobních kroků. [1]. Příklad mikromechanické struktury je zobrazen na obr. 1.



Obr. 1 Příklad mechanické struktury MEMS pod mikroskopem [4]

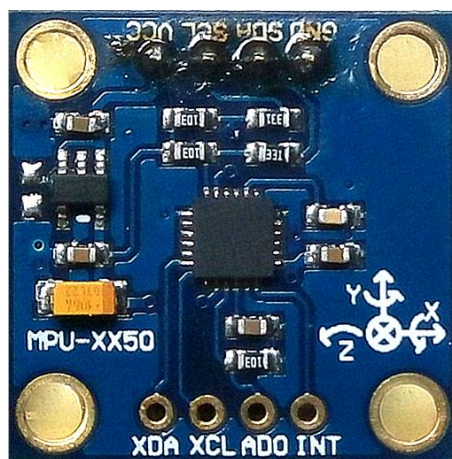
3.1.2 Charakteristika

MPU-6050, který je použit, je senzor v pouzdře SMD (z ang. Surface-Mount Device). Technologie osazování DPS součástkami s drátovými vývody (THT, z ang. Through-Hole Technology) dosáhla svých limitů z hlediska snížení ceny, hmotnosti a velikosti. Pro stále složitější aplikace je potřeba nových výrobních postupů upevnění komponentů na plošný spoj.

SMT umožňuje osazovat DPS za současného zlepšení zmíněných faktorů díky zvýšení hustoty osazení, šetření materiálu při výrobě komponentů a automatické montáži. Součástky v SMD pouzdře mohou být až desetkrát lehčí a zabírat až o polovinu méně plochy než jejich protějšky s drátovými vývody. Jedná se o typ pouzdra, jehož vývody se pájí přímo na povrch DPS. Není tedy potřeba vytvářet otvory a pájet součástku z druhé strany, než je umístěna. SMT navíc zlepšuje odolnost proti vibracím a nárazům z důvodu menší hmotnosti součástek a zmenšuje parazitní ztráty energie způsobené vedením [5].

MPU-6050 kombinuje 3-osý akcelerometr, 3-osý gyroskop a Digital Motion Processor (DMP), který zpracovává data ze senzorů a zajišťuje přenos informací s řídicím členem. Vyniká zejména svou energetickou nenáročností, při zapojení všech součástí odebírá pouze 3,9mA, a malými rozměry, přičemž velikost součástky je 4x4mm a celého plošného spoje (obr. 2), který byl použit, 23x23mm. Navíc senzor disponuje low-power módem, který umožňuje snímač uspat pro snížení spotřeby.

Dále obsahuje tři 16-bitové A/D převodníky pro gyroskop i akcelerometr. Rozsah akcelerometru je možné nastavit na ± 2 , 4, 8 nebo 16g a gyroskopu na ± 250 , 500, 1000 nebo 2000°/s, přičemž platí, že čím menší rozsah, tím větší citlivost a přesnost. Dále obsahuje FIFO buffer s velikostí 1024 bytů pro shromáždění dat a jejich následného čtení pomocí přerušení po přetečení. Komunikace s registry senzoru probíhá pomocí sběrnice I²C [3].



Obr. 2 DPS s MPU-6050 a pomocnými obvody

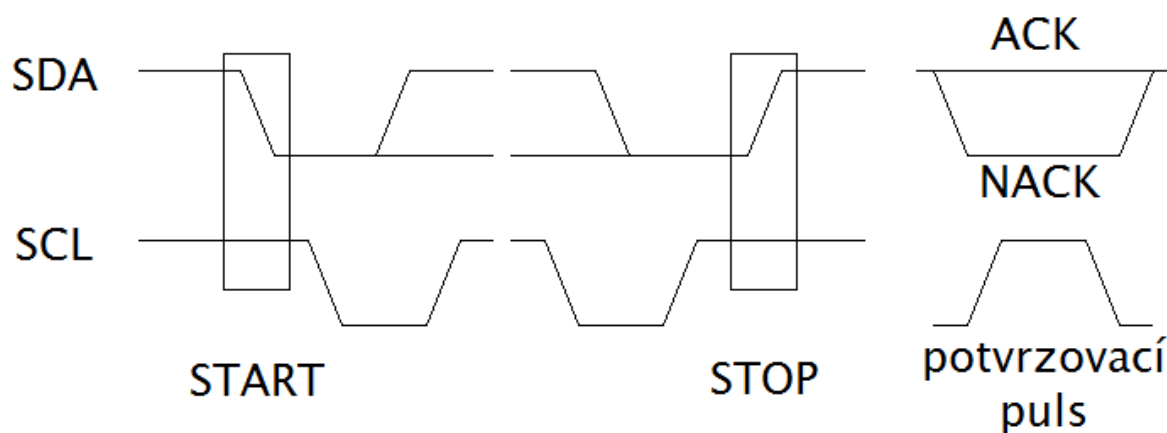
3.1.3 Sběrnice I²C

I²C (IIC, z anglického Internal-Integrated-Circuit Bus) je jednoduché, výkonné a přizpůsobitelné rozhraní, které podporuje režim master-slave. Jedná se o synchronní, half-duplex sběrnici a používány jsou pouze dva vodiče: SCL (serial clock) pro hodinový signál a SDA (serial data) pro přenos dat. Na jednu sběrnici může být připojeno více zařízení. V základní verzi jsou adresovány 7-bitově. To umožňuje připojení až 128 čipů s různou adresou na jednu společnou sběrnici. Oba vodiče musejí být pomocí pull-up rezistorů ve výchozím stavu v logické jedničce [6].

MPU-6050 pracuje vždy v režimu slave. Jeho adresa je b110100X, kde X je určeno logickou hodnotou na pinu AD0 senzoru, tudíž mohou být propojeny dva senzory MPU-6050 na stejnou sběrnici I²C.

Hodinový signál, který zajišťuje časování komunikace, je generovaný masterem. Komunikace začíná START signálem od mastera: přechod HIGH-to-LOW na vodiči SDA zatímco vodič SCL je v log.1. Přenos probíhá až do vyslání STOP podmínky masterem: přechod LOW-to-HIGH na SDA zatímco SCL je v log.1. Kromě START a STOP podmínky, všechny změny na SDA musejí být při log. 0 na vodiči SCL. Každý poslaný byte musí být následovaný potvrzovacím bitem (ACK, z ang. acknowledge), který je generovaný příjemcem a je definován jako log. 0 na vodiči SDA během potvrzovacího pulsu na SCL.

Po START podmínce následuje adresa zařízení, se kterým bude probíhat komunikace a osmý bit indikující, že master bude data zapisovat. Master poté čeká na potvrzovací bit od slave zařízení. Master dále pošle adresu registru, se kterým chce pracovat, doprovázený opět ACK signálem. V případě, že informace budou zapisovány do slave zařízení, následují vlastní data prokládána ACK signálem od slave zařízení a spojení končí podmínkou STOP. Pokud se jedná o čtení dat, master pošle znovu START podmínku, adresu zařízení a bit značící čtení. Slave zařízení vyšle ACK signál následující daty, která jsou prokládána ACK signálem od master zařízení. V tomto případě komunikace končí NACK (z ang. not acknowledge) signálem a podmínkou STOP. Signál NACK je značeno log. 1 na vodiči SDA během potvrzovacího pulsu [3]. Na obr. 3 jsou graficky znázorněny signály START, STOP (vlevo), ACK a NACK (vpravo).



Obr. 3 Signály START, STOP, ACK a NACK

3.2 8x8 LED matice s řadičem MAX7219

LED technologie je založena na vlastnostech polovodičů. Při průchodu proudu P-N přechodem v propustném směru dochází k uvolňování energie. LED se označuje polovodičová dioda, která emituje energii ve formě světla. Různým chemickým složením polovodiče lze dosáhnout různých vlnových délek záření a tedy i barvy vyzařovaného světla od ultrafialové, přes viditelné spektrum po infračervené [7].

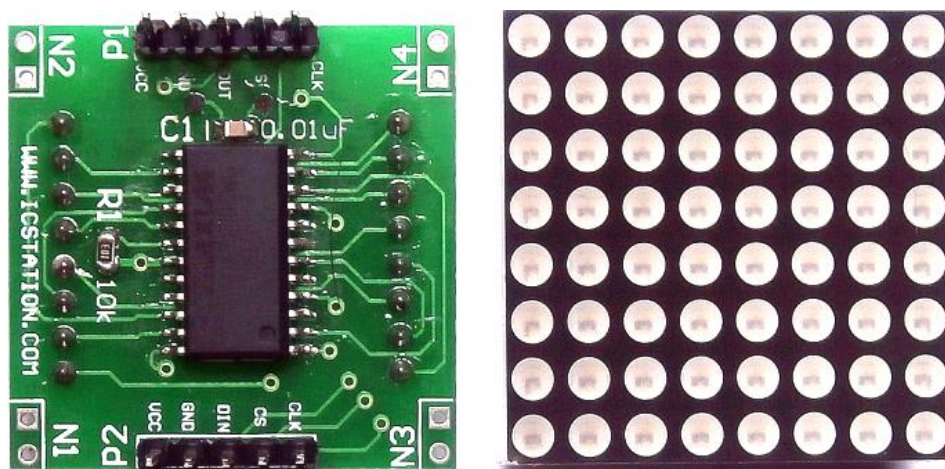
3.2.1 Charakteristika

LED matice, která byla určena pro tuto práci, je 8x8 LED matice se společnou katodou a s řadičem MAX7219 od firmy MAXIM. Model řadiče, který byl použit, je v SMD pouzdře. MAX7219 dokáže obsluhovat až 64 individuálních LED, tzn. až 8 sedmisegmentových cifer. Řadič obsahuje 64-bitovou paměť pro uložení nastavení rozsvícených LED, tudíž není nutné průběžné programování každý programový cyklus, ale pouze při změně. Informace o tom, jaké LED mají být rozsvíceny a další nastavení, jsou předávány řadiči, který poté tyto pokyny zpracuje a reprezentuje na LED matici.

Energetická náročnost se odvíjí od počtu LED, které mají být rozsvícené. Pokud není rozsvícena žádná dioda, je odběr pouze 8mA. V případě, že má být rozsvíceno všech 64 diod je hodnota odebíraného proudu samotným řadičem zanedbatelná. Pro snížení spotřeby je možné uvést řadič do sleep modu.

Při ovládání sedmisegmentových displejů umožňuje řadič MAX7219 dekodování BCD (z ang. Binary Coded Decimal). V tom případě stačí pouze čtyři bity místo osmi pro zobrazení znaků 0-9, -, E, H, L a P. Toto dekodování lze nastavit zvlášť pro každý segment.

LED matice s řadičem sestává ze dvou částí: vlastní LED matice, jejíž rozměry jsou 32x32mm, a DPS s řadičem MAX7219 a pomocnými obvody (obr. 4). Mikrokontrolér komunikuje s řadičem po sběrnici SPI. Z DPS s řadičem poté vede 16 vodičů do LED matice - jeden na každý sloupec i řádek [8].



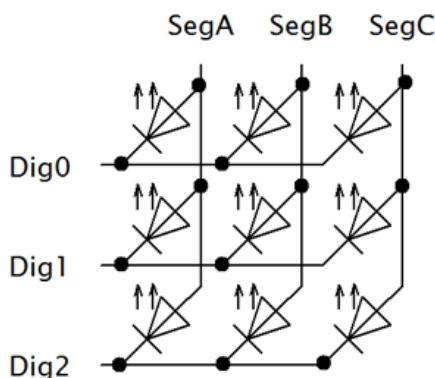
Obr. 4 DPS s řadičem a pomocnými obvody (vlevo) a LED matice (vpravo)

3.2.2 Multiplexing

Při zobrazování dat na maticovém displeji se využívá jev zvaný setrvačnost zraku, způsobený slabou rozpoznávací schopností lidského oka, které vnímá při frekvenci blikání vyšší než přibližně 50Hz objekt jako svítící [9]. Z toho těží postup zvaný multiplexing.

Jak je vidět na obr. 5, vnitřní zapojení multiplexing vyžaduje. Tento obrázek zobrazuje schéma 3x3 LED matice se společnou katodou, pro větší matice je princip stejný. V každém sloupci jsou spojené katody a v řádku anody. Bez multiplexování by nebylo možné rozsvítit libovolnou kombinaci LED. Řadič MAX7219 multiplexuje po řádkách. To znamená, že přepíná

mezi jednotlivými řádky okolo 800krát za vteřinu při všech řádkách, v případě méně řádků se frekvence zvyšuje [8]. Tímto postupem je značně snížen celkový jas vnímaný lidským okem. Na druhou stranu však multiplexing příznivě ovlivňuje spotřebu, jelikož na 8x8 matici může v jednom okamžiku svítit pouze jeden řádek, tzn. maximálně 8 diod. Z hlediska množství pinů na řídicím členu se většinou jedná o nutnost.



Obr. 5 Maticové zapojení se společnou katodou

Pro zobrazení například hlavní diagonály je postup jednoho cyklu pro 3x3 LED matici znázorněn na obr. 6. Na první řádek (Dig0) je přivedena logická 0, čímž je uzemněn, ostatní řádky jsou drženy v log. 1. Na sloupce je poté přivedena informace. V tomto případě na první sloupec (SegA) log. 1 a na zbylé log. 0. Dig1 a Dig2 jsou v log. 1, tudíž na diodách 0.1 a 0.2 není žádné napětí, neprotéká proud a diody nesvítí. V dalším kroku je přivedena na Dig1 log. 0, na zbylé řádky log. 1, na SegA log. 1 a na zbylé sloupce log. 0. Obdobně pro třetí řádek [10].

| | | SegA | SegB | SegC |
|------|---|------|------|------|
| | | 1 | 0 | 0 |
| Dig0 | 0 | 0.0 | 1.0 | 2.0 |
| Dig1 | 1 | 0.1 | 1.1 | 2.1 |
| Dig2 | 1 | 0.2 | 1.2 | 2.2 |

| | | SegA | SegB | SegC |
|------|---|------|------|------|
| | | 0 | 1 | 0 |
| Dig0 | 1 | 0.0 | 1.0 | 2.0 |
| Dig1 | 0 | 0.1 | 1.1 | 2.1 |
| Dig2 | 1 | 0.2 | 1.2 | 2.2 |

| | | SegA | SegB | SegC |
|------|---|------|------|------|
| | | 0 | 0 | 1 |
| Dig0 | 1 | 0.0 | 1.0 | 2.0 |
| Dig1 | 1 | 0.1 | 1.1 | 2.1 |
| Dig2 | 0 | 0.2 | 1.2 | 2.2 |

Obr. 6 Průběh jednoho cyklu při rozsvícení hlavní diagonály

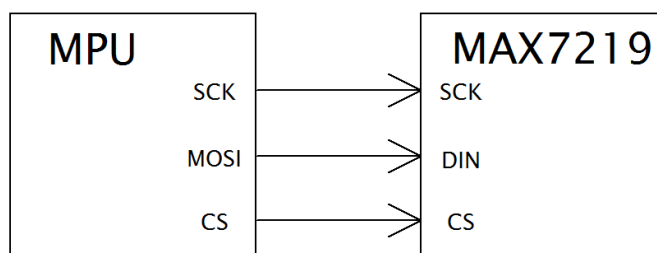
Jas LED diod je řadičem MAX7219 regulován pomocí pulzní šířkové modulace (PWM). Při stejné frekvenci se mění poměr doby v high stavu (střída) a celé periody. Čím větší poměr, tím větší jas. Při multiplexování 8-mi řádků je jasné, že poměr může být maximálně 1/8.

Jelikož je jas při vysoké frekvenci závislý na době svícení LED a hodnotě protékajícího proudu [10], je možné, že LED jsou přetěžovány vyššími než nominálními proudy pro dosažení vyššího jasu. Řadič MAX7219 umožňuje deaktivovat některé segmenty (v případě LED matice sloupce) pro zvýšení rychlosti multiplexování a tudíž i zvýšení jasu. Veškeré pokyny, jako je zmíněná deaktivace segmentů (sloupců), jas, ale i nastavení rozsvícených LED, jsou prováděny zápisem do příslušného registru [8].

3.2.3 Sběrnice SPI

Komunikace probíhá pomocí sběrnice SPI (Serial Peripheral Interface), která používá hierarchii master-slave a pouze 4 vodiče.

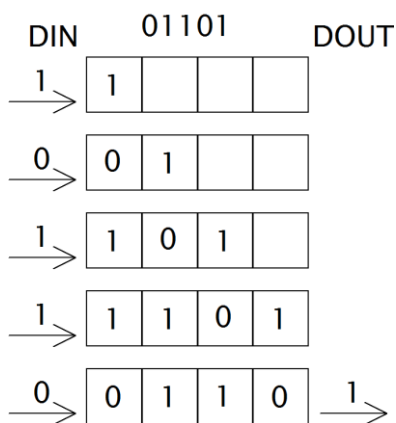
Master generuje hodinový signál, který je rozveden do zařízení slave pomocí vodiče SCK, čímž je umožněn zcela synchronní přenos dat. Data jsou přenášena vodiči MOSI (z ang. Master Out Slave In) a MISO (z ang. Master In Slave Out), tudíž je umožněn plný duplex. Pro výběr slave zařízení slouží vodič CS [6]. Na obr. 7 je zobrazeno schéma použitého propojení MPU a řadiče MAX7219. Mikrokontrolér pracuje v režimu master, řadič v režimu slave. Jelikož data nejsou čtena, vodič MISO není použit.



Obr. 7 Propojení MPU a řadiče MAX7219

Hodinový signál je přiváděn z MPU na pin SCK. Data vysílána masterem jsou přenášena vodičem MOSI-DIN (z ang. Data IN). Pro výběr slave zařízení slouží pin CS. Tento vodič je nutný i v případě jednoho slave zařízení na sběrnici.

Komunikace s řadičem MAX7219 probíhá pomocí 16-bitového posuvného registru [8]. Princip 4-bitového posuvného registru je znázorněn na příkladu přenosu informace 01101 na obr. 8.



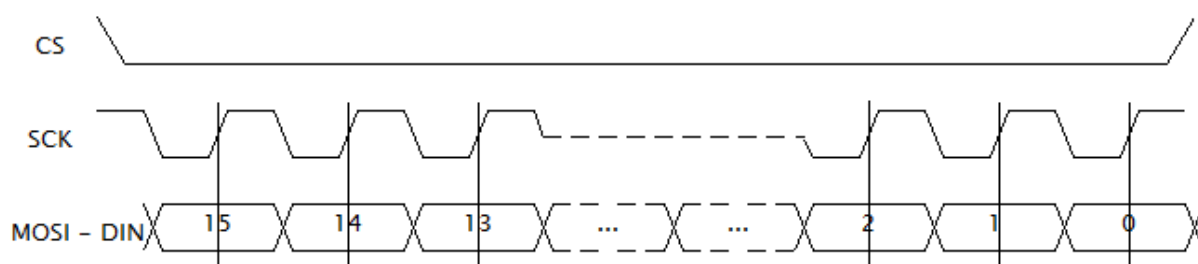
Obr. 8 Princip posuvného registru

Data jsou přiváděna na vstup posuvného zásobníku DIN, s každým další přijatým bitem posunována o jedno místo a po naplnění celého posuvného registru je informace posílána na pin DOUT.

Z knihoven, které jsou použity pro komunikaci mezi MPU a řadičem MAX7219, je zřejmý průběh komunikace. Ucelená posílaná informace pro jeden řadič se skládá z 16 bitů.

První 4 posílané bity neslouží k ničemu [8], posílá se vždy 0000. Další 4 bity jsou adresa registru, do které se mají uložit data z posuvného registru po ukončení komunikace. Následuje 8 bitů vlastních dat.

Před začátkem komunikace je pin CS nastaven na log. 0, tudíž řadič během doby přenosu nečte z posuvného registru. Poté je pin CLK nastaven na log. 0, je poslán jeden bit dat (DIN log.0/1) a CLK je přepnut na log. 1. Hodinový signál generuje jeden pulz na každý poslaný bit. Rychlost komunikace není tedy explicitně určena. Pro skončení komunikace je přivedena na pin CS log. 1, což je signál pro řadič, aby zpracoval data z posuvného registru. V případě, že master chce, aby slave nic nedělal, zaplní jeho registr nulami. Data jsou do posuvného registru čtena s náběžnou hranou CLK. Přenos 16 bitů při jednom řadiči je znázorněna na obr. 9.



Obr. 9 Přenos 16 bitů při zapojení jednoho řadiče

V případě více propojených řadičů je DOUT předchozího řadiče připojen na DIN následujícího. Vstupy CS všech řadičů jsou spojeny na jeden výstup mastera. Posuvné registry všech takto do série zapojených řadičů se propojí. V případě například 3 řadičů je posíláno 3x16 bitů. Při posílání 17. bitu je první poslaný bit (MSB, z ang. Most Significant Bit) posunut z posuvného registru prvního řadiče do druhého (pin DOUT 1. řadiče je připojen na DIN 2. řadiče) a tak dále, dokud data nejsou posunuta až nakonec. Prvních 16 vyslaných bitů je tedy pro třetí řadič atd. [8].

3.3 ATmega32A

Jako řídicí jednotka je použit mikrokontrolér řady ATmega. ATmega32A je 8-bitový RISC mikrokontrolér od firmy Atmel. Model, který byl zvolen, je v SMD pouzdře o velikosti 12x12mm [11].

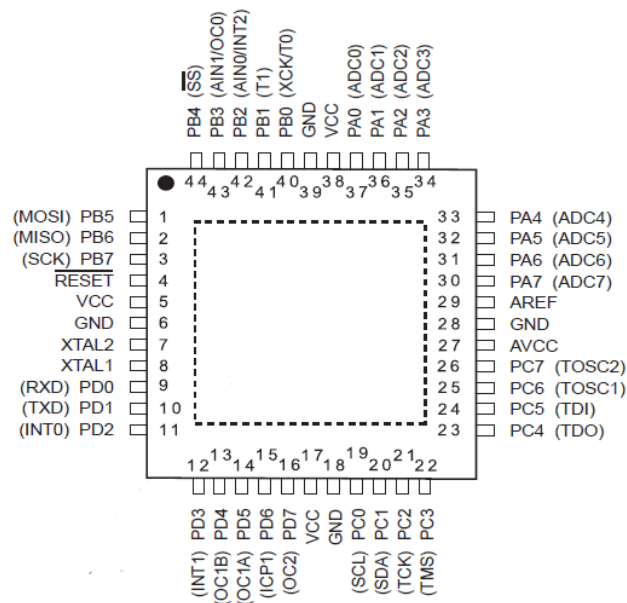
Při výrobě byla aplikována technologie CMOS (z ang. Complementary Metal-Oxide-Semiconductor). Používá se při výrobě integrovaných obvodů, včetně mikrokontrolérů a elektronické paměti SRAM. Hlavní výhoda spočívá ve zvýšení hustoty prvků, vyšší odolnosti proti šumu a nízké spotřebě ve statickém stavu [12].

Mezi hlavní prvky mikrokontroléru ATmega32A patří 32KB flash paměti pro uložení programu, 1024B EEPROM a 2KB SRAM. Dále dva 8-bitové časovače/čítače, jeden 16-bitový časovač/čítač, a osm 10-bitových A/D převodníků. A/D převodníky mohou využívat 3 reference. Vnější, kterou připojíme na piny VREF, vnitřní 2,54V, nebo VCC. K dispozici je 44

pinů, z nichž 32 je programovatelných vstupů/výstupů (I/O). Pracovní frekvence je až 16MHz a je umožněno připojení externího krystalu pro dosažení přesného časování. Na mikrokontroléru jsou přímo určené piny pro sběrnice SPI, I²C a USART pro jejich snazší použití. Například na pinech PC0 a PC1, které jsou určeny pro sběrnici I²C, jsou již implementovány pull-up rezistory. Tyto piny lze však použít i pro jinou činnost.

ATmega32A je uzpůsobena k práci v širokém rozpětí napájecího napětí. Konkrétně v rozmezí 2,7-5,5V. Spotřeba elektrického proudu v aktivním stavu je definovaná při frekvenci 1MHz, napájecího napětí 3V a okolní teplotě 25°C na 0,6mA [11].

Mikrokontrolér ATmega32A byl zvolen zejména z důvodů malých rozměrů, velikosti paměti pro uložení programu a nízké ceně. Na obr. 10 je znázorněno rozložení pinů MPU.



Obr. 10 ATmega32A [11]

4 REALIZACE

Cílem této kapitoly je aplikace nashromážděných informací na výrobu produktu pro propagační účely. Nejprve budou vymezeny požadavky, jaké by měl výrobek splňovat, poté bude stručně popsán jeho vývoj a výroba a vlastní software mikrokontroléru. Zvláštní kapitola bude věnována napájení.

4.1 Požadavky

Projekt byl tvořen s ohledem na několik požadavků. Důraz byl kladen na kompaktnost, napájení z akumulátoru, implementaci nabíjecího obvodu a v neposlední řadě umožnění programování mikrokontroléru.

Vytvořená DPS by měla mít maximální rozměr, jako LED matice (32x32mm), a baterie dostatečnou kapacitu při co nejmenších rozměrech, aby nadměrně nezvětšovala celkový rozměr. Napětí na baterii může dosahovat vyšší než nominální hodnoty napětí, tudíž musí být napětí stabilizované na požadovanou úroveň pomocí stabilizátoru. Jelikož je vybití akumulátoru pod určitou, většinou prodejcem uvedenou, hodnotu nežádoucí, mělo být tedy softwarově přes AD převodník hlídáno její napětí a případně odpojena zátěž. Baterie se taktéž při nabíjení zahřívá, mělo být tedy zajištěno její ochlazování. Produkt by také měl být odolný a vnitřní součásti pevně uchyceny, zejména nabíjecí obvod, na který bude během připojování a odpojování konektoru vyvíjen nemalý tlak. To by mělo zajišťovat pouzdro ve tvaru krychle, které musí být navíc navrženo tak, aby jej bylo možné vytisknout na 3D tiskárně z ABS plastu.

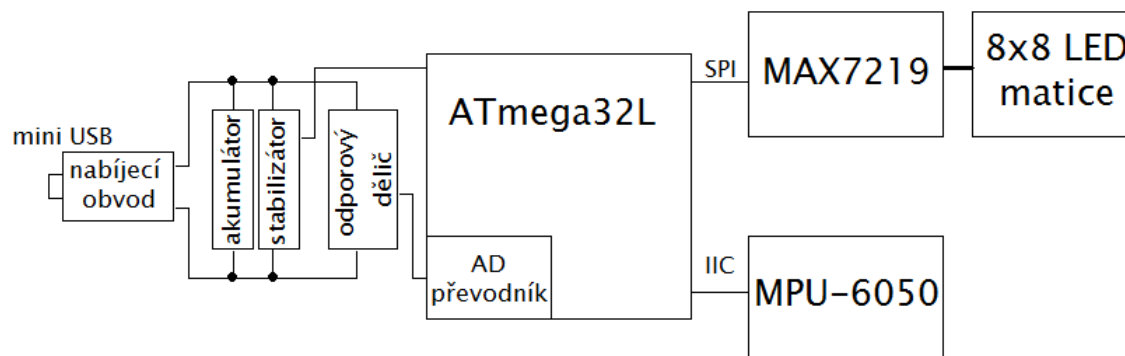
4.2 Vývoj

Vývoj programu probíhal na vývojovém kitu MB ATmega32L, který disponuje mikrokontrolérem řady ATmega, přesným krystalem, vyvedenými všemi I/O piny [13]. Tato vývojová deska je osazena MPU ATmega32L. Jedná se o předchůdce použitého MPU ATmega32A. K ladění programu a čtení dat byla využívána sběrnice USART.

Vlastní program byl psán v programu Atmel Studio 6.2. Toto vývojové prostředí umožňuje nastavit požadovaný model mikrokontroléru, což je vhodné například pro kontrolu správnosti názvu registrů. Disponuje několika režimy kompilace kódu, které se mohou soustředit na redukci výsledné velikosti kódu nebo zvýšení rychlosti, pro dosažení požadovaných vlastností programu.

S ohledem na požadavky byl vytvořen návrh řešení. Akumulátor je zapojen paralelně s nabíjecím obvodem a stabilizátorem. Stabilizované napětí je poté rozvedeno do ostatních součástí. Nestabilizované napětí, jež je větší než reference A/D převodníku, je nutné vést na pin převodníku přes odporový dělič, jenž toto napětí vhodně upraví. Stabilizátor a odporový dělič budou umístěny na vyrobeném plošném spoji společně s mikrokontrolérem a dalšími pomocnými obvody jako například krystalem pro přesné časování.

Jak již bylo zmíněno, MPU komunikuje se senzorem MPU-6050 přes sběrnici I²C a s řadičem MAX2719 přes SPI. Z řadiče poté vede 16 vodičů do LED matice. Schéma řešení je zobrazeno na obr. 11.



Obr. 11 Blokové schéma aplikace

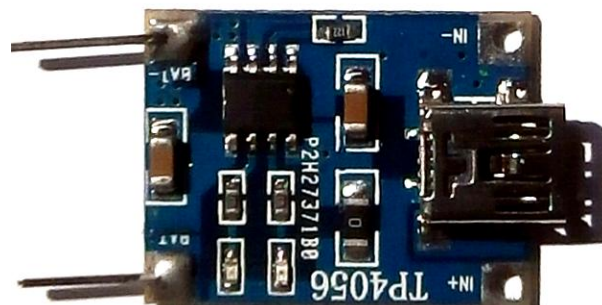
4.3 Napájení

Pro napájení je zvolen akumulátor Li-pol 3,7V 900mAh. Tato baterie je kompromisem mezi rozměry a kapacitou. Její rozměry jsou 5.0 x 34.0 x 48.0 mm. Obsahuje PCM - ochranný obvod, který ji chrání před zkratem, podbitím a přebitím. Ten slouží pouze jako nouzová pojistka.

S ohledem na provozní napětí senzoru MPU-6050, řadiče MAX7219 a MPU ATmega32A, je určena hodnota napájecího napětí všech součástí 3,3V. Jelikož nominální napětí baterie je 3,7V a požadované 3,3V, je zvolen stabilizátor LE33CD, zejména kvůli lowdrop napětí 0,2V a odběru pouze 0,5mA.

Lowdrop napětí stabilizátoru znamená, o kolik bude vždy výstupní napětí nižší než vstupní. V praxi to znamená, že žádaných 3,3V bude k dispozici pouze, pokud napětí na vstupu bude minimálně 3,5V [14].

Baterie je nabíjena nabíjecím obvodem TP4056 (obr. 12). Velikou výhodou tohoto obvodu je, že jeho výstupní napětí je okolo 4,1V, takže nemůže baterii přebít nad dodavatelem bezpečnou úroveň napětí. Nabíjení probíhá přes rozhraní mini USB.



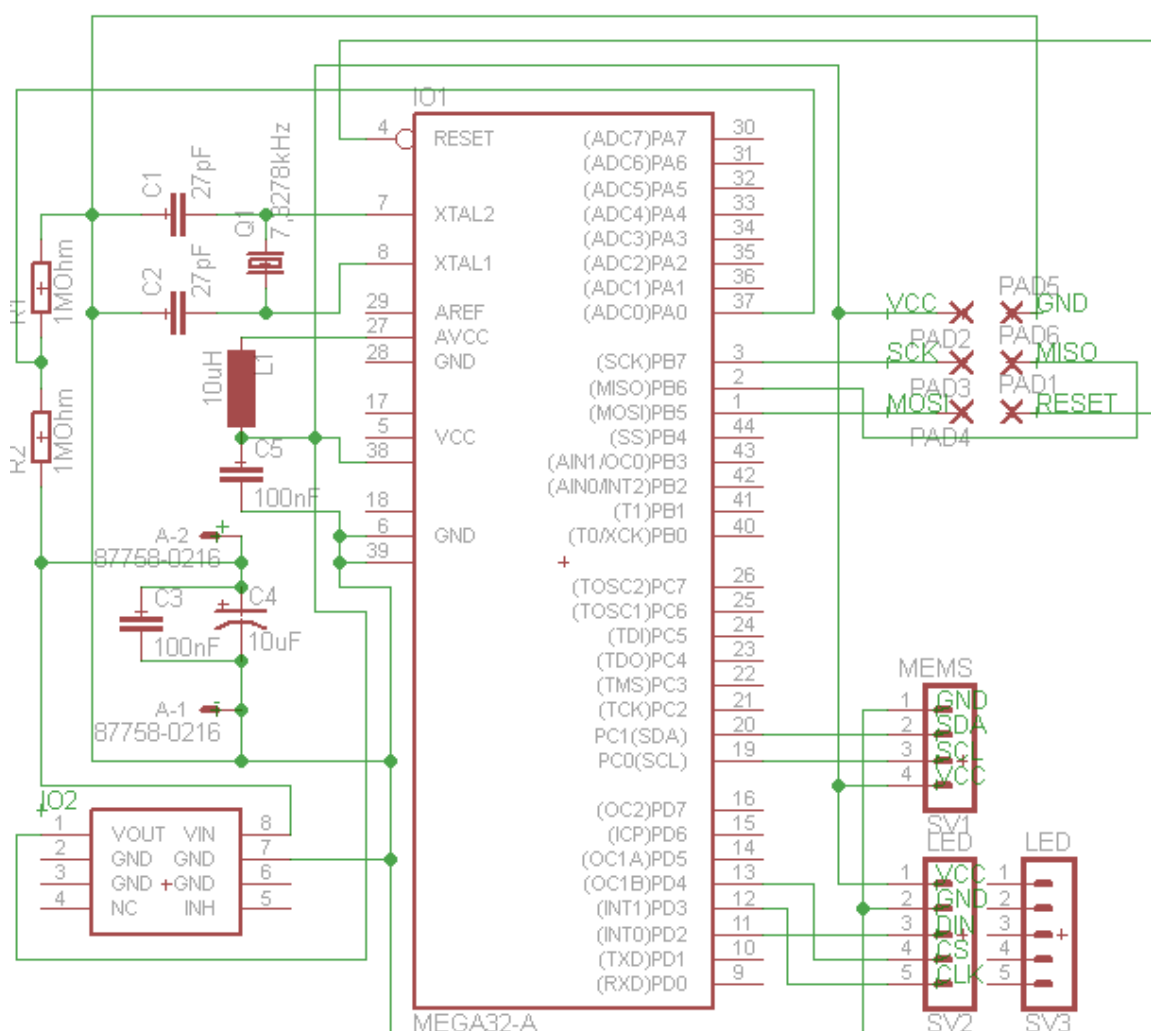
Obr. 12 Nabíjecí obvod

4.4 DPS

Vzhledem k relativní jednoduchosti DPS byla zhotovena metodou tzv. nažehlení ve spolupráci s vedoucím práce. Jedná se o postup výroby plošného spoje, při němž dojde k přenesení toneru na vodivou desku, a pomocí leptacího roztoku je odstraněna vodivá vrstva tam, kde není toner. Tato metoda však neumožňuje přesnou výrobu oboustranných DPS, výsledný plošný spoj musí být tedy jednostranný s případnými drátovými propojkami na druhé straně.

4.4.1 Návrh a výroba

Návrh DPS byl proveden ve freeware verzi programu Eagle. Schéma zapojení je zobrazeno na obr. 13. Schéma a výkres DPS v programu Eagle je na příloženém CD.



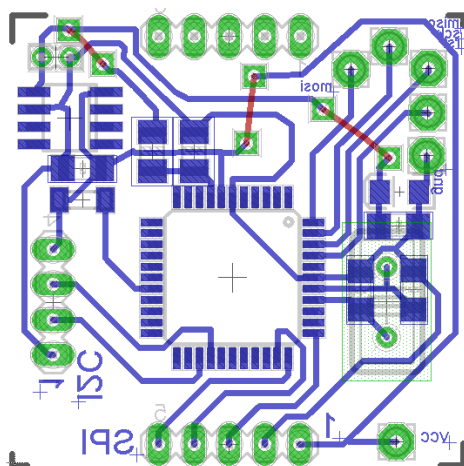
Obr. 13 Schéma zapojení

Napájecí část se skládá z konektoru pro vstupní nestabilizované napětí z akumulátoru (A-1, A-2) a stabilizátoru LE33CD. Stabilizované napětí je poté rozvedeno do mikrokontroléru a připojených periférií. Důležitou úlohu mají kondenzátory C3 a C4, jež blokují napájecí napětí

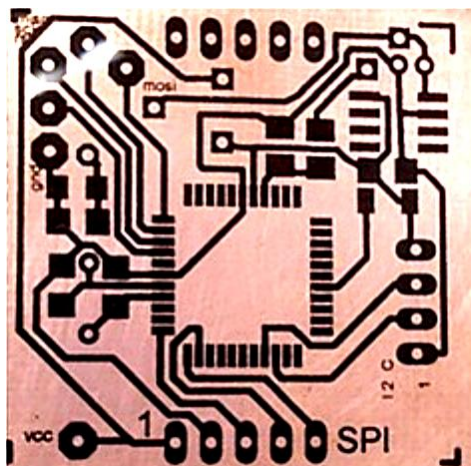
prvků. Jelikož minimální přijatelná hodnota napětí na akumulátoru je vyšší než používaná reference A/D převodníku 2,54V, je nestabilizované napětí měněno přes odporový dělič (R1 a R2) na polovinu a přivedeno na pin PA0 (A/D převodník, kanál 0). Návrh rovněž obsahuje cívku L1 a kondenzátor C5, které vyhlazují napájecí napětí pro A/D převodník.

Krystal (Q1) je připojen přímo k mikrokontroléru na piny XTAL1 A XTAL2. Dále jsou zapojeny obvyklé blokovací kondenzátory C1 a C2. DPS také disponuje vývody pro programování mikrokontroléru přes ISP rozhraní (PAD 1 až PAD 6) a konektory pro komunikaci se senzorem (MEMS) a řadičem (LED) [6].

Pro dosažení požadovaných rozměrů byly použity součástky kromě krystalu v SMD pouzdře (Tabulka 1). Výkres desky plošných spojů je uveden na obr. 14. Stav po nažehlení toneru a před leptání je zobrazen na obr. 15.



Obr. 14 Výkres DPS



Obr. 15 DPS po nažehlení

Tabulka 1

| označení | název | množství |
|----------|--------------------------|----------|
| IO1 | mikrokontrolér ATmega32A | 1 |
| IO2 | stabilizátor LE33CD | 1 |
| Q1 | krystal 7.372MHz | 1 |
| R1, R2 | odpor 100kΩ | 2 |
| C1, C2 | kondenzátor 27pF | 2 |
| C3, C5 | kondenzátor 100nF | 2 |
| C4 | kondenzátor 10uF | 1 |
| L1 | tlumivka 10uH | 1 |

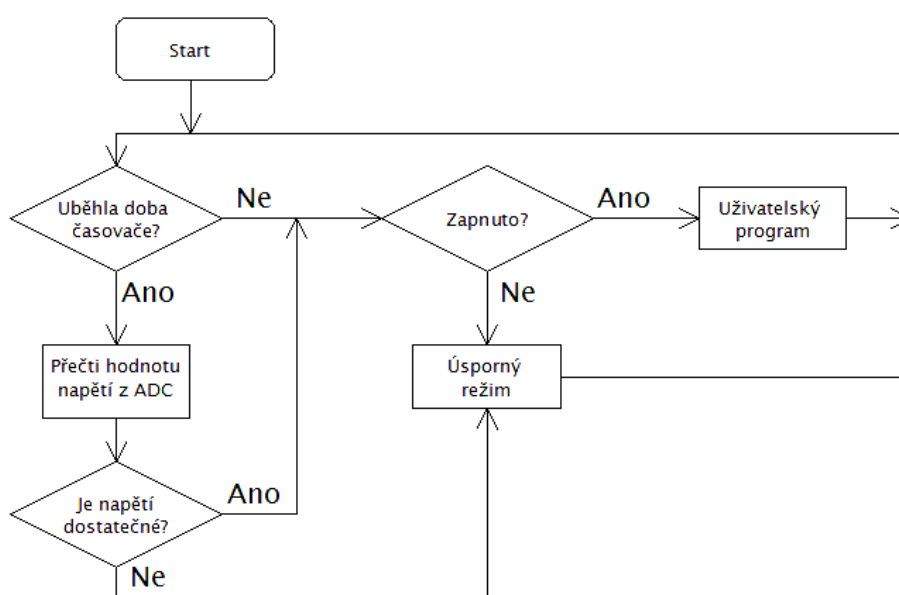
Dále byl použit konstrukční materiál jako jsou dutinkové lišty a oboustranné pájecí kolíky.

4.5 Program mikrokontroléru

Při psaní kódu a úpravě knihoven byla použita odborná literatura [15]. Program je psaný v programovacím jazyku ANSI C. Pro zpřehlednění hlavního kódu byla vytvořena nová knihovna

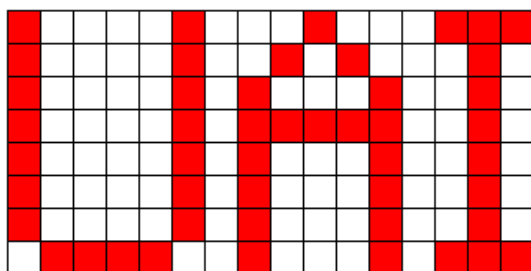
mylib.c, která obsahuje funkce pro čtení z A/D převodníku, indikaci změny programu a slabé baterie a další pomocné funkce.

Na obr. 16 je znázorněna hlavní smyčka programu. Úroveň napětí je, pro úsporu energie pouze každé 4 vteřiny, čtena z A/D převodníku, poté vyhodnocena. a v případě klesnutí napětí pod 3,5V dojde k vypnutí. Pro zajištění co nejnižšího odběru v tomto režimu dojde k zhasnutí všech LED, uspání MPU-6050 a radiče MAX7219 a přepnutí mikrokontroléru do režimu Idle. K probuzení MPU dojde pomocí přerušení vyvolané časovačem každých 20ms. Avšak pouze po uplynutí minimální doby 250ms dojde k probuzení MEMS senzoru a ke kontrole podmínky probuzení. V opačném případě dojde k opětovnému zavedení režimu Idle. K zapnutí dojde pouze v případě, že je splněna daná podmínka a napětí na akumulátoru je dostatečné. Pokud alespoň jedno z kritérií není splněno, dojde k opětovnému uspání senzoru a MPU. V režimu zapnuto probíhá uživatelem zvolený program (kostka, kulička, gyroskop). Při splnění příslušné podmínky dojde k přechodu do režimu vypnutí.

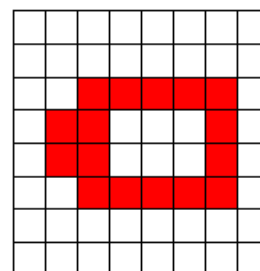


Obr.16 Schéma hlavní smyčky programu

Přepínání mezi jednotlivými uživatelskými režimy probíhá akcelerací ve svislé ose o více než 2g. Zapnutí probíhá postavením prototypu displejem nahoru po dobu 2 vteřiny. Po zapnutí dojde formou posuvného textu k zobrazení zkratky Ústavu Automatizace a Informatiky: UAI (obr. 17). K vypnutí dojde po 5 vteřinách orientace modulu displejem směrem dolů, přechod do tohoto režimu je signalizován zobrazením písmene Z. V případě poklesnutí napětí akumulátoru během režimu zapnuto je indikován stav nízké baterie na LED matici (obr. 18).



Obr. 17 Zobrazení zkratky ústavu



Obr. 18 Indikace slabé baterie

4.5.1 MPU-6050

Pro práci se senzorem MPU-6050 byly použity na internetu volně dostupné knihovny [16], které byly psány pro ATmega168. Po úpravách na použitý mikrokontrolér byly implementovány. MEMS senzor běží v režimu, který získává surová data z akcelerometru a přepočítaná z gyroskopu, což zajišťují knihovny mpu6050.c a mpu6050.h. Surová data reprezentují hodnotu z A/D převodníku senzoru. Přepočítané údaje jsou již v závislosti na nastaveném rozsahu upravena na jednotky stupně za vteřinu. Tyto knihovny dále umožňují například nastavení rozsahu akcelerometru $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$ nebo $\pm 16g$ a gyroskopu ± 250 , ± 500 , ± 1000 nebo $\pm 2000^\circ/s$. Komunikaci obstarávají knihovny twimastertimeout.c a i2cmaster.h. FIFO buffer není pro účely práce využit a údaje jsou čteny při každém programovém cyklu.

4.5.2 LED matice

Při psaní programu byly použity na internetu volně dostupné knihovny [17], které byly bez větších úprav implementovány. Protokol SPI je realizován softwarově pomocí knihoven max7219.c a max7219.h, tudíž není řadič ovládán jako periférie, ale program sám ovládá log. hodnoty na pinech a hlídá náležitosti sběrnice SPI. Mohou být tedy použity libovolné piny MPU. Rychlost komunikace v tomto případě tedy záleží na rychlosti provádění programu. Logickou analýzou v laboratoři bylo zjištěno, že komunikace probíhá nejrychleji při 200kHz, přičemž maximální rychlost, kterou umožňuje řadič MAX7219, je 10MHz [8].

Pro uživatele jsou určeny knihovny ledmatrix7219d88.c, ledmatrix7219d88.h, které funkce z výše uvedených knihoven volají a umožňují pomocí několika funkcí ovládat LED matici. Obsahují například funkce pro rozsvícení nebo zhasnutí individuální LED a nastavení intenzity svícení.

4.5.3 Pracovní režimy

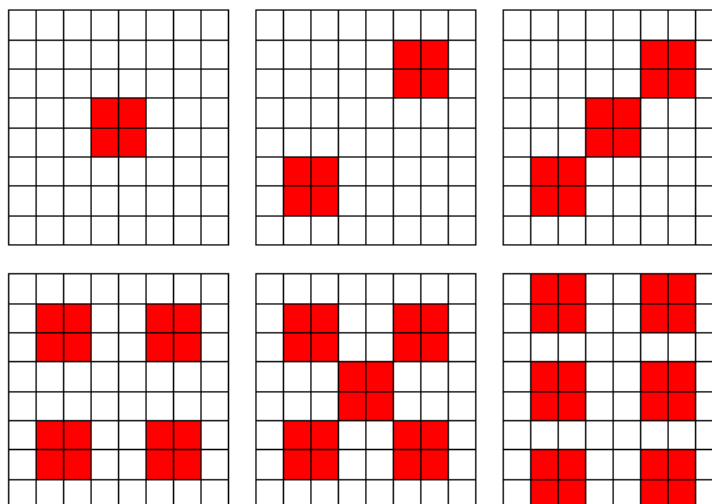
Data z MPU-6050 jsou v mikrokontroléru zpracována dle zvoleného programu, který se přepíná akcelerací v ose Z o více, než přibližně $20m/s^2$. Program nabízí 3 režimy - hrací kostka, kulička a gyroskop. Změna programu je symbolicky signalizována na LED matici (herní kostka pro režim kostka, diagonálně se pohybující objekt pro režim kulička a šipka pro režim gyroskop).

Hrací kostka

Tento režim simuluje hrací kostku, po přetížení v ose x nebo y o více než přibližně $20m/s^2$ (reprezentace hodu) dojde k zobrazení čísla 1-6 na LED matici (obr. 19). Generátor "náhodných" čísel je realizován inkrementováním příslušné proměnné každý programový cyklus v režimu kostka v rozmezí 1-6. V případě splnění podmínky hodu kostkou je tato proměnná přečtena příslušnou funkcí pro zobrazení.

Kulička

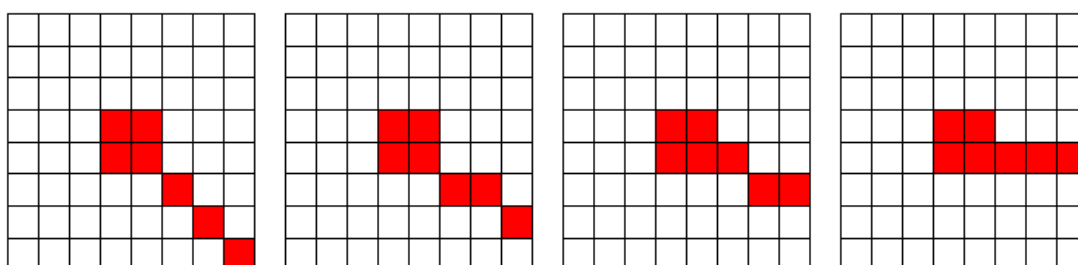
Při naklánění roviny XY se kulička, reprezentována jednou rozsvícenou diodou, pohybuje tak, jako kdyby byla umístěna desce, a na hraně je zastavena. Rychlost pohybu je měněna v závislosti na míře náklonu. Kulička reaguje od náklonu zhruba 3° .



Obr. 19 Zobrazení číslic v režimu kostka

Gyroskop

Při přerušení vyvolané časovačem každé 0,02s je přečtená úhlová rychlost ve stupních za vteřinu vynásobena právě uběhlým časem časovače. Suma poté reprezentuje relativní polohu od začátku měření. Vypočítané relativní natočení je převedeno na hodnotu 0-359° a poté na číslo 0-27 určující jednu z obvodových LED. Pomocí vytvořené funkce je poté vykreslena střelka gyroskopu (obr. 20). Jelikož gyroskop neustále detekuje malou rotaci i při klidovém stavu, je nutné použít korekci pro zajištění správné funkce.

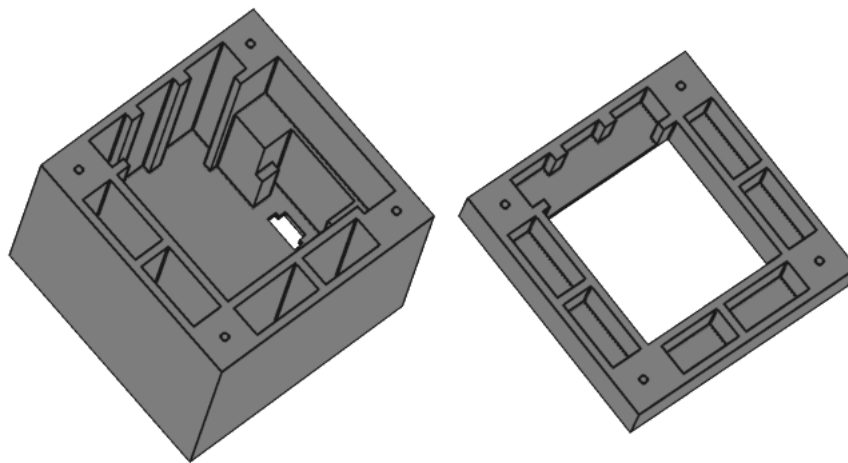


Obr. 20 Střelka gyroskopu

4.6 Pouzdro

Návrh byl proveden v programu Autodesk Inventor, výrobu provedl Ing. Marada v laboratoři VUT pomocí technologie 3D tisku z ABS plastu. Jedná se o krychli o délce hrany 56mm. Byl kladen důraz na pevné uchycení nabíjecího obvodu a ostatních součástí a odvětrávání

akumulátoru. Z důvodu možnosti nepřesné výroby byly zvoleny větší vůle, zejména kolem LED matice. Model pouzdra (obr. 21) v programu Autodesk Inventor je součástí přílohy.

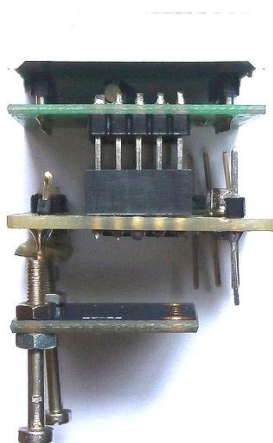


Obr. 21 Model pouzdra

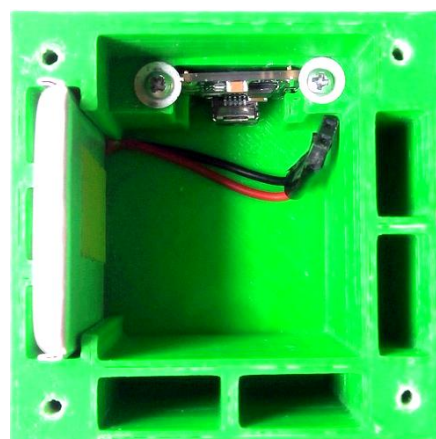
4.7 Sestavení

Výsledný modul (obr. 22) se skládá z DPS se senzorem MPU-6050, který je pro dosažení větší pevnosti konstrukce napevno připájen k vyrobenému plošnému spoji pájecími kolíky. Vyrobená DPS je poté spojena prostřednictvím pájecích kolíků a dutinkových lišt s DPS obsahující řadič MAX7219. Stejným způsobem je řešena soudržnost této desky se samotnou LED maticí. Pro regulaci výšky modulu a zarovnání LED matice s hranou krychle slouží dva stavěcí šrouby na spodní straně.

Pasivní ochlazování akumulátoru je realizováno odsazením od ostatních součástí i stěn pouzdra. Napájecí obvod, jehož rozhraní mini USB je vyvedeno na spodní straně krychle, je uchyceno pomocí vrutů a podložek (obr. 23).

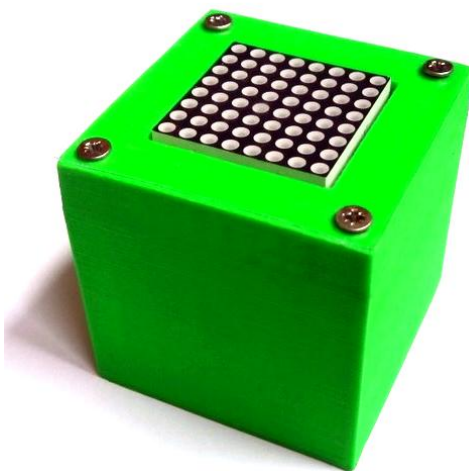


Obr. 22 Výsledný modul



Obr. 23 Uložení baterie a napájecího obvodu

Na obr. 24 je zobrazen konečný vzhled výrobku. Víko je čtyřmi vruty spojeno se spodní částí pouzdra. Vrchní strana je kryta průhlednou folií.



Obr. 24 Finální produkt

5 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo seznámení s MEMS, senzory postavených na této technologii a ovládání LED matic s řadičem. Získané poznatky byly aplikovány na návrh a výrobu prototypu pro propagační účely VUT, Fakulty strojního inženýrství a Ústavu automatizace.

Demonstrační úloha obsahuje tři režimy - hrací kostka, kulička a gyroskop. Mikrokontrolér obstarává komunikaci s periferiemi, kontroluje napětí na akumulátoru a případně signalizuje jeho nízký stav a přejde do režimu snížené spotřeby, což znamená uspání senzoru i řadiče a přechod MPU do režimu Idle. Nabíjecí obvod je pevně usazen, akumulátor lze tedy nabíjet pomocí rozhraní USB mini. Vyrobené pouzdro chrání vnitřní součásti a měla by být tedy zajištěna dostatečná odolnost výrobku.

Data ze senzoru jsou získávána mikrokontrolérem, jenž je dle uživatelem zvoleného programu zpracovává a předává řadiči. Softwarová struktura je realizována tak, aby byla lehce pochopitelná i pro další programátory/ky, kteří/ré mohou na tuto práci navázat, a umožňuje rozsáhlé rozšíření funkcí. Při komunikaci po sběrnících I²C i SPI nebyl zaznamenán problém. Nechybí ani programovací piny pro přeprogramování.

Do budoucna by bylo vhodné použít další funkce MPU-6050 jako například datový filtr a FIFO buffer, který umožňuje shromažďování údajů a v případě přetečení vyvolat přerušení. Absence zmíněných funkcí vede k nepřesnostem. Zejména je to znatelné v režimu gyroskop, kdy dojde po určité době k posunutí střelky.

Mikrokontroléry ATmega32A disponují více módy snížené spotřeby. Oproti režimu Idle vynikají svou úsporou energie například Standby, Power-Save a Power-Down. Ty však nebylo možné použít. Pro probuzení by bylo potřeba použít externí přerušení nebo další krystal pro asynchronní režim timeru [11], s čímž se při návrhu tohoto prototypu nepočítalo. V tomto provedení je hodnota protékajícího proudu v režimu úspory energie zhruba 4.2mA. Při počítání s nominálními hodnotami akumulátoru to znamená výdrž 9 dnů.

Paměť mikrokontroléru je zaplněna zhruba z 24%, což dovoluje rozsáhlé rozšíření programu. V případě pouhých 64 LED je reprezentace údajů omezena. Velice zajímavá by byla aplikace grafického displeje, který by umožňoval zobrazení grafů a vykreslení detailů a tudíž výrazné rozšíření i návrh nových uživatelských režimů. Dále by bylo vhodné zmenšit rozměry výrobku. I při použití menšího displeje a výrobě oboustranné DPS, což by mohlo výrazně zredukovat její velikost, tomu však brání rozměry akumulátoru. V současné době trh nenabízí vhodný kompromis mezi rozměry a kapacitou.

Osobně bych se chtěl této problematice věnovat dále ve svém studiu i následném zaměstnání, případně aplikovat mikrokontrolér a MEMS senzor na další projekty.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] RUSSEL, Kay. *MEMS*. Computerworld [online]. 2007, roč. 41, č. 10, s. 30 [cit. 2015-4-22]. Dostupné z: <http://search.proquest.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/docview/216106883/fulltext/36C11F4656A34C14PQ/1?accountid=17115>
- [2] HUSÁK, Miroslav. *AKCELEROMETRY* [online]. [cit. 2015-4-22]. Dostupné z: <http://www.micro.feld.cvut.cz/home/x34ses/prednasky/08%20Akcelerometry.pdf>
- [3] *MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification Revision 3.4* [online]. 2013 [cit. 2015-4-22]. Dostupné z: http://store.invensense.com/datasheets/invensense/MPU-6050_DataSheet_V3%204.pdf
- [4] GANSSLE, Jack. *A Designer's Guide to MEMS Sensors* [online]. 2012 [cit. 2015-4-22]. Obrázek. Dostupné z: <http://www.digikey.com/en/articles/techzone/2012/jul/a-designers-guide-to-mems-sensors>
- [5] *Component Surface Mount Technology, Intel Manufacturing Enabling Guide* [online]. 2010 [cit. 2015-4-22]. Dostupné z: <http://www.intel.com/content/dam/www/public/us/en/documents/guides/ch1-component-surface-mount-technology-guide.pdf>
- [6] MATOUŠEK, David. *Práce s mikrokontroléry ATMEL AVR ATmega16. 4. díl. 1. vyd.* Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-174-8.
- [7] CLARKSON, Douglas. LED technology. *The Optician* [online]. Sutton: Reed Business Information UK, 2006, roč. 232, č. 6065, s. 16 [cit. 2015-04-22]. Dostupné z: <http://search.proquest.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/docview/229349172?OpenUrlRefId=info:xri/sid:primo>
- [8] *MAX7219/MAX7221 Serially Interfaced, 8-Digit LED Display Drivers* [online]. 2003 [cit. 2015-4-22]. Dostupné z: <http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX7219-MAX7221.pdf>
- [9] ŘÍČNÝ, Václav. *Videotechnika: přednášky* [online]. 2006 [cit. 2015-4-22]. Dostupné z: http://www.urel.feec.vutbr.cz/web_documents/literature/mvdk.pdf
- [10] *Introduction to Driving LED Matrices* [online]. 2013 [cit. 2015-4-22]. Dostupné z: <http://www.avagotech.com/docs/AV02-3697EN>
- [11] *8-bit Microcontroller with 32KBytes In-System Programmable Flash ATmega32A* [online]. 2014 [cit. 2015-4-22]. Dostupné z: http://www.atmel.com/Images/Atmel-8155-8-bit-Microcontroller-AVR-ATmega32A_Datasheet.pdf
- [12] KWON, Min-Jun. *CMOS technology* [online]. 2011 [cit. 2015-4-22]. Dostupné z: <http://site.ebrary.com/lib/VUTBRFME/reader.action?docID=10681096>
- [13] *MB-ATmega16/32 v2.0 Základová deska modulárního vývojového systému MVS* [online]. 2004 [cit. 2015-4-22]. Dostupné z: http://www.pk-design.net/Datasheets/Zakladova_deska_ATmega16_32_v20.pdf

- [14] DAY, Michael. *Understanding Low Drop Out (LDO) Regulators* [online]. [cit. 2015-4-22]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ml/slup239/slup239.pdf>
- [15] BURKHARD, Mann. *C pro mikrokontroléry*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2004. s.16-178. ISBN 80-7300-077-6.
- [16] GIRONI, Davide. *AVR Atmega MPU6050 gyroscope and accelerometer lib + processing* [online]. 2013 [cit. 2015-4-22]. Dostupné z: http://davigeroni.blogspot.cz/2013/02/avr-atmega-mpu6050-gyroscope-and.html#.VOn-8vmG_fI
- [17] GIRONI, Davide. *AVR Atmega multiple 8x8 led matrix using MAX7219* [online]. 2013 [cit. 2015-4-22]. Dostupné z: http://davigeroni.blogspot.cz/2013/02/avr-atmega-mpu6050-gyroscope-and.html#.VOn-8vmG_fI

SEZNAM PŘÍLOH

| | | |
|------------------|----|---|
| Příloha 1 | CD | 1.BP - elektronická verze práce |
| | | 2.DPS - Schéma a výkres DPS v programu EAGLE |
| | | 3.Pouzdro - Model pouzdra v programu Autodesk Inventor 2014 |
| | | 4.Program - Program mikrokontroléru v programu Atmel Studio 6.2 |