Univerzita Pardubice

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Jednonápravový balancující robot

Václav Kubizňák

Bakalářská práce

2013

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Akademický rok: **2012/2013**

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení:	**Václav Kubizňák**
Osobní číslo:	**I09036**
Studijní program:	**B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor:	**Komunikační a mikroprocesorová technika**
Název tématu:	**Jednonápravový balancující robot**
Zadávající katedra:	**Katedra elektrotechniky**

Zásady pro vypracování:

Úkolem je vytvoření balancujícího robota schopného udržet rovnováhu na jedné nápravě.
Teoretická část práce bude obsahovat popis problému, možnosti určení polohy robota vůči podložce (akcelerometr, gyroskop, inklinometr), možnosti řízení DC motorů, možnosti regulace inverzního kyvadla.
Praktická část bude potom realizace stabilizace robota pomocí mikroprocesoru na základě znalosti polohy nebo změny polohy vůči podložce.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

RIPKA, P.; TIPEK, A. : Master Book of Sensors. Praha : BEN, 2003. ISBN 0-12-752184
BALÁTĚ J.: Automatické řízení, BEN, ISBN 978-80-7300-148-3
ŠULC B.; VÍTEČKOVÁ M.: Teorie a praxe návrhů regulačních obvodů, ČVUT, ISBN 80-01-03007-5
http://www.uzimex.cz/soubory/20070103_maxon_serial.pdf
http://automatizace.hw.cz/motory-jejich-rizeni-s-mcu-1-cast-typy-motoru
http://automatizace.hw.cz/motory-jejich-rizeni-s-mcu-2-cast-spinaci-mustky-jejich-pripojeni-k-mcu
http://automatizace.hw.cz/motory-jejich-rizeni-s-mcu-3-cast-ridici-algoritmy-regulace-s-mcu
Mobilní roboty Novák P,;:BEN - technická literatura, 2005, ISBN: 80-7300-141-1
www.robotika.cz

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Pavel Rozsíval**
Katedra elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **21. prosince 2012**
Termín odevzdání bakalářské práce: **10. května 2013**

Univerzita Pardubice Česká republika

L.S.

prof. Ing. Simeon Karamazov, Dr.
děkan

Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 29. března 2013

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.
Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 24. 5. 2013

Václav Kubizňák

Poděkování

Chtěl bych poděkovat všem, kteří mi byli nápomocni při tvorbě bakalářské práce. Především bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Pavlovi Rozsívalovi, za jeho pomoc při samotné konstrukci robota a cenné rady. Dále bych rád poděkoval své rodině za všestrannou podporu po celou dobu mého studia.

ANOTACE

Téma této bakalářky je navrhnout a zrealizovat robota schopného udržet rovnováhu na jedné nápravě.
V teoretické části je popsán fyzikální model a je ho převod na matematické rovnice. Dále je tu popis jednotlivých senzorů, které se používají pro zjištění polohy. A nakonec elektrické motory, typy motorů, jejich vlastnosti a možnosti řízení.
Praktická část se věnuje sestavení elektronické části robota. Jsou zde popsány konkrétní použité součástky, nastavení a programování mikroprocesoru a použitého senzoru.

KLÍČOVÁ SLOVA

inverzní kyvadlo, akcelerometr, DC motor, ATmega88, mikrokontrolér

TITLE

One-axle balancing robot

ANNOTATION

Main topic of this thesis is design of one axel balancing robot. Theoretical part of the work describes derivation of mathematical model from the physical one. This part also contains description and possibilities of sensors used for position estimation and measurement and at the end position actuators and their controlling options, characteristics and selection. Practical part describes electronic design of real robot model, description of electronic part used, principle of operation and finally control algorithm with code description.

KEYWORDS

inverted pendulum, accelerometer, DC motor, ATmega88, microcontroller

Obsah

Seznam zkratek 9

Seznam obrázků 9

Seznam tabulek 11

Úvod 12

1 Inverzní kyvadlo 13

1.1 Dynamické rovnice 13

1.2 Pohybové rovnice 16

2 Senzory 17

2.1 MEMS 17

2.2 Inklinometr (sklonoměr) 17

2.3 Gyroskop 17

2.3.1 Princip 17

2.3.2 Princip gyroskopu MEMS 18

2.3.3 Coriolisova sila 19

2.4 Akcelerometr 20

2.4.1 Kapacitní akcelerometr 20

2.4.2 Piezoelektrické akcelerometry 22

2.4.3 Piezorezistivní akcelerometry 22

3 Elektromotory 24

3.1 Princip 24

3.2 Stejnosměrné (kartáčové) motory 24

3.3 Bezkartáčové stejnosměrné (BLDC) motory 25

3.4 Asynchronní motory 26

3.5 Krokové motory 27

3.6 Senzory pro zjištění pohybu a polohy motoru 28

3.6.1 Inkrementální enkodéry 28

3.6.2 Absolutní enkodéry 30
4 Praktické sestavení 31
4.1 Mikropočítač 31
4.1.1 ATmega88 31
4.1.2 Vlastnosti ATmega88 pouzdro 32MLF dle datasheetu: 33
4.2 Akcelerometr 34
4.2.1 Vlastnosti: 35
4.2.2 Typické aplikace: 35
4.2.3 Výběr rozsahu 36
4.2.4 Pohotovostní režim 37
4.2.5 Měřící režim 38
4.2.6 Komunikace 38
4.2.7 Orientace akcelerometru a odezva výstupu 39
4.3 H-můstek 41
4.4 Návrh desky plošného spoje 42
4.5 Programování 44
4.5.1 Vývojoví diagram 45
4.5.2 Nastavení mikrokontroléru 46
4.5.3 Nastavení akcelerometru 49
4.5.4 Výpočet úhlu a PID regulátor 50
5 Závěr 52
Literatura 53
Příloha A – Seznam součástek 55
Příloha B – Schéma obvodu 56
Příloha C – Obsah přiloženého CD 57

Seznam zkratek

SPI	Serial Peripheral System
I2C	Inter-Integrated Circui
MISO	Master In Slave Out
MOSI	Master Out Slave In
CS	Chip Select
SS	Slave Select
SDO	Serial Data Out
SDI	Serial Data In
SMD	Surface Mount Device
PWM	Pulse-width modulation
MEMS	Mikro-elektro-mechanick systems
GPS	Global Positioning System
BLDC	Brushless DC electric motor
RISC	Reduced Instruction Set Computing
CISC	Complex Instruction Set Computer
TTL	Transistor-transistor-logic

Seznam obrázků

Obrázek 1 – Soustava inverzního kyvadla....13

Obrázek 2 – Uvolněné první těleso soustavy....14

Obrázek 3 – Uvolněné druhé těleso soustavy....15

Obrázek 4 - Gyroskop v Cardanových závěsech....18

Obrázek 5 - Tělísko uchycené v rámu....18

Obrázek 6 - Příklad funkce struktury snímače gyroskopu při rotaci....19

Obrázek 7 - Působení Coriolisovy síly na proudění v tlakové níži....20

Obrázek 8 - Zjednodušený princip kapacitního akcelerometru....21

Obrázek 9 - Struktura 2D kapacitního akcelerometru....21

Obrázek 10 - Struktura Piezoelektrického akcelerometru....22

Obrázek 11 - Piezorezistivní akcelerometr....23

Obrázek 12 - DC motor....25

Obrázek 13 - BLDC motor....26

Obrázek 14 - Klec nakrátko 27
Obrázek 15 - Inkrementální enkodér 29
Obrázek 16 - Jeden signál z enkodéru 30
Obrázek 17 - Druhý o 90° fázově posunutý signál 30
Obrázek 18 - Kotouč absolutního enkodéru 30
Obrázek 19 - Vnitřní architektura ATmega88 32
Obrázek 20 - Blokové schéma akcelerometru 36
Obrázek 21 - Rozmístění pinů 38
Obrázek 22 - Doporučené zapojení pro SPI 39
Obrázek 23 - Doporučené zapojení pro I2C 39
Obrázek 24 - Orientace a hodnoty vůči zemi 40
Obrázek 25 - Pouzdro Multiwatt 15 pro L298 42
Obrázek 26 - Deska TOP 43
Obrázek 27 - Deska BOTTOM 43
Obrázek 28 - Model osazené desky 43
Obrázek 29 - Foto osazené desky (TOP) 44
Obrázek 30 - Foto osazené desky (BOTTOM) 44
Obrázek 31 - Vývojový diagram 45
Obrázek 32 - působení gravitační síly na akcelerometr 50
Obrázek 33 - pravoúhlý trojúhelník s vyznačeným úhlem α 50

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Výběr použití hodin 33
Tabulka 2 - Maximální hodnoty 36
Tabulka 3 - $16: Mode Control Register (Read/Write) 37
Tabulka 4 - Nastavení Rozsahu pomocí GLVL bitů 37
Tabulka 5 - Nastavení režimu akcelerometru 37
Tabulka 6 - Popis pinů 38
Tabulka 7- Porovnání zrychlení a výstupu 40
Tabulka 8 - Maximální hodnoty 41
Tabulka 9 - TCCR0A registr 46
Tabulka 10 - TCCR0B registr 46
Tabulka 11 - COM0A1:0 bity 46
Tabulka 12 - COM0B1:0 bity 46
Tabulka 13 - WGM02:0 režim časovače/čítače 47
Tabulka 14 - Nastavení děliče 47
Tabulka 15 – SPCR registr 48
Tabulka 16 - Nastavení děliče 48
Tabulka 17 - SPSR registr 48
Tabulka 18 - $18 Control 1 registr 49

Úvod

Cílem práce je sestavit jednoosého balancujícího robota, což je princi inverzního kyvadla. Na podobném principu existují například dvoukolá vozítka Segway PT (Personal Transporter) od firmy Segway inc.. Pro udržení rovnováhy bude potřeba sensor polohy. Sensor bude komunikovat s mikrokontrolérem, který bude dále data zpracovávat a pomocí výstupu na pohonnou jednotku korigovat náklon.

První kapitola se nejdříve bude věnovat principiální a fyzikální stránce. Tedy vytvoří se fyzikální model, který se rozebere na části a matematicky popíše.

Další kapitola je zaměřená na snímače polohy. Tedy je zde vysvětlena technologie integrovaných snímačů a vyjmenovány jednotlivé senzory, které je možné využít, jejich princip, výhody použití a nevýhody.

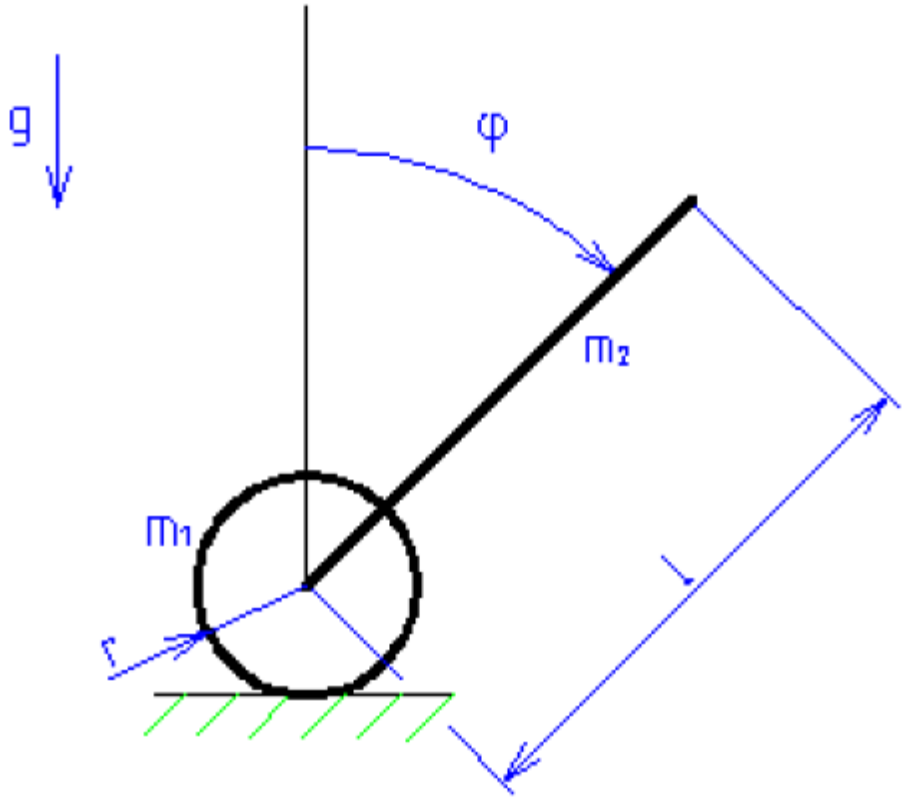
Ve třetí je rozebrána problematika pohonu, jsou zde popsány principy, možnosti řízení, výhody a nevýhody jednotlivých elektromotorů. Dále je zde popsán princip snímání otáček a natočení motoru.

Čtvrtá kapitola je pak věnována praktické realizaci, je zde popsán použitý mikrokontrolér ATmega88, senzor polohy, který byl vybrán jako akcelerometr MMA7455L, a použitý pohon, který bude sestaven z integrovaného obvodu L298 a ze stejnosměrných motorů. Dále je zde popsán návrh desky plošných spojů, samotné programování.

V závěrečné části je celá práce vyhodnocena, popsána a odůvodněna funkčnost celého zařízení.

1 Inverzní kyvadlo

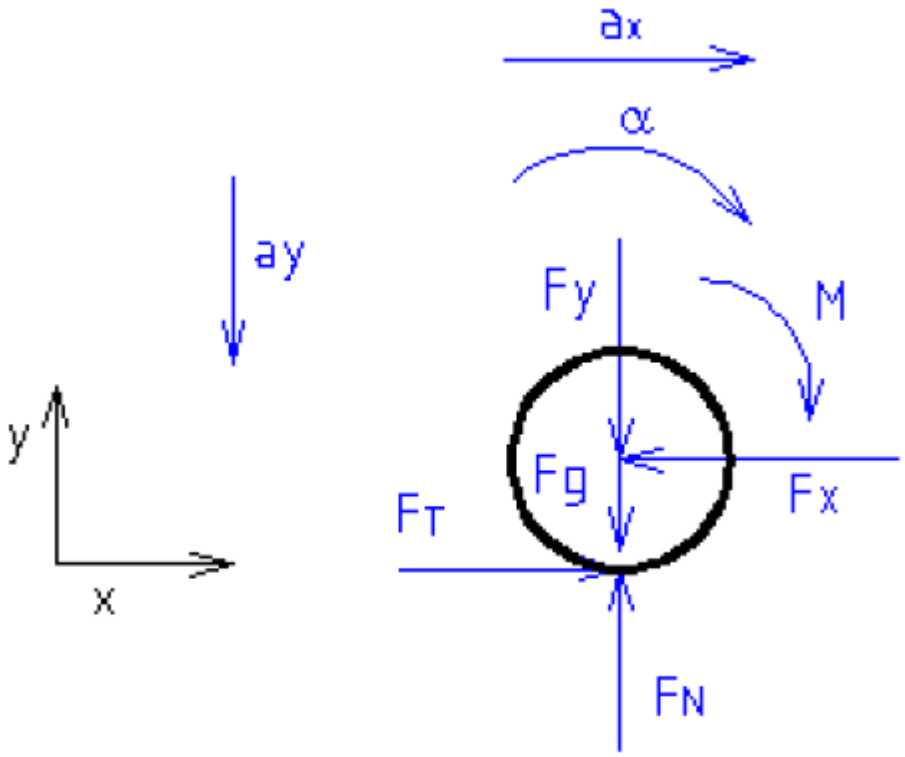
Z fyzikálního hlediska balancující robot není nic jiného než inverzní kyvadlo, které má dva stupně volnosti. Pro snadnější představu chování si vytvoříme dynamické a pohybové rovnice celé soustavy. Při tomto popisu zanedbáme valivé tření kol a tření v uchycení kol, dále neuvažujeme deformaci kol a ramena kyvadla.



Obrázek 1 – Soustava inverzního kyvadla

1.1 Dynamické rovnice

Pro jednoduché získání dynamických rovnic nejdříve celou soustavu uvolníme, tedy rozdělíme na jednotlivé pohyblivé části, které jsou k sobě připojeny. Po uvolnění dostaneme dvě části, první částí jsou kola a druhou rameno kyvadla. Obě části vložíme do souřadnicového systému a popíšeme síly, které na ně působí. Síly působící ve vazbách jsou u druhé části vyznačeny s opačnou silou. Pak lehce můžeme vytvořit dynamické rovnice pro posun v každé ose a rotace.



Obrázek 2 – Uvolněné první těleso soustavy

$$X:\ m \cdot a_x = F_T - F_X \tag{1.1}$$

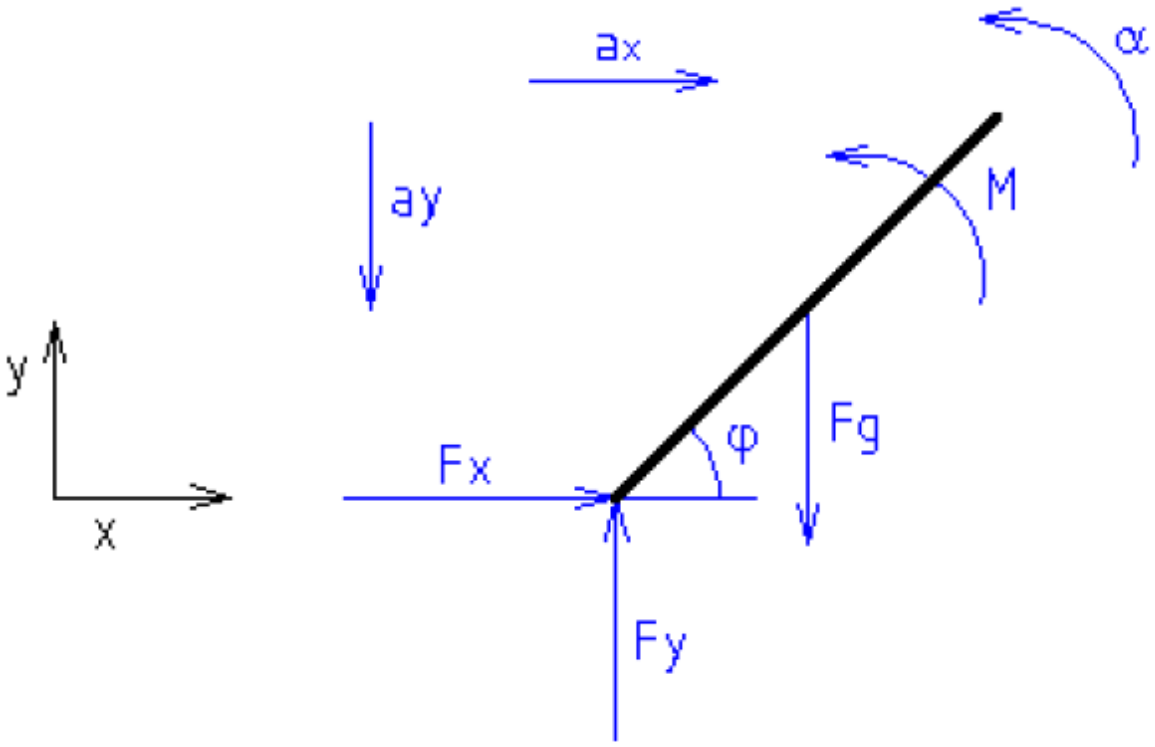
$$Y:\ -m \cdot a_y = F_N - F_y - F_g$$

$$X:\ -I \cdot \alpha = -M + F_T \cdot r$$

Kde:

- m – hmotnost soustavy
- a_x – zrychlení v ose x
- F_T – tečná síla
- F_x – síla ve vazbě v ose x
- a_y – zrychlení v ose y
- F_N – normálová síla
- F_y – síla ve vazbě v ose y
- F_g – tíhová síla
- I – moment setrvačnosti
- α – úhlové zrychlení

- M – řídící moment
- r - poloměr kola



Obrázek 3 – Uvolněné druhé těleso soustavy

$$X\colon\ m \cdot a_x = F_x \tag{1.2}$$

$$Y\colon\ -m \cdot a_y = -F_y - F_g$$

$$M\colon\ I \cdot \alpha = M - \frac{F_g \cdot l}{2}\cos(\varphi)$$

Kde:

l – délka kyvadla

φ – úhel naklonění ramena kyvadla

Hmotnost (m) a moment setrvačnosti (I) jsou součty celé soustavy, tedy hmotnost se skládá z hmotnosti kol a hmotnosti ramena kyvadla a moment setrvačnosti se skládá z momentu setrvačnosti kol v ose a ramena kyvadla na jeho konci.

Z těchto šesti rovnic si vyjádříme jednu neznámou jako parametr, protože zde máme sedm neznámých. Zvolíme například zrychlení v ose x, které se dá vyjádřit jako součin úhlového zrychlení a poloměru kol, tedy:

$$a_x = \alpha_T \cdot r \tag{1.3}$$

1.2 Pohybové rovnice

Řešením dynamických rovnic pak dostaneme rovnice pohybové.

$$a_x = \frac{2 \cdot M}{3 \cdot m \cdot r} \tag{1.4}$$

$$\alpha = \frac{M}{I} - \frac{F_g \cdot \frac{l}{2} \cdot \cos(\varphi)}{I}$$

Integrací první rovnice získáme ze zrychlení v ose x (a_x) rychlost v ose x (v_x) a po další integraci budeme mít polohu v ose x (x). Z druhé rovnice, úhlového zrychlení, byla první integrací získána úhlová rychlost ω a druhou integrací potom úhel natočení φ.

$$x = \int (\int a_x \cdot dt) dt \tag{1.5}$$

$$\varphi = \int (\int \alpha \cdot dt) dt$$

2 Senzory

2.1 MEMS

Je označení technologie malých zařízení. Je to velmi sofistikované umístění nejen elektronických, ale i mechanických prvků na jedné křemíkové desce. Jedná se především o senzory (akcelerometry, gyroskop,…), ale i o mikročerpadla, mikropohony, mikrocívky a další. O těchto produktech se hovoří jako o systému na čipu nebo taky inteligentní snímači, protože zde není jen mechanický snímač, ale i elektronická část, která dále zajišťuje zpracování signálu.

2.2 Inklinometr (sklonoměr)

Je přístroj, který měří náklon oproti vertikální nebo horizontální rovině. Základem je kyvadlový gyroskop o třech stupních volnosti. Ten to gyroskop vytváří rovinu, od které pomocí sil vychylujících ho ze základní polohy měříme sklon. Sklon je převede na elektrický signál, ten můžeme zpracovat a zobrazit jako údaj. Inklinometry se používají s gyroskopickými přístroji pro korekci jejich úniku (driftu).

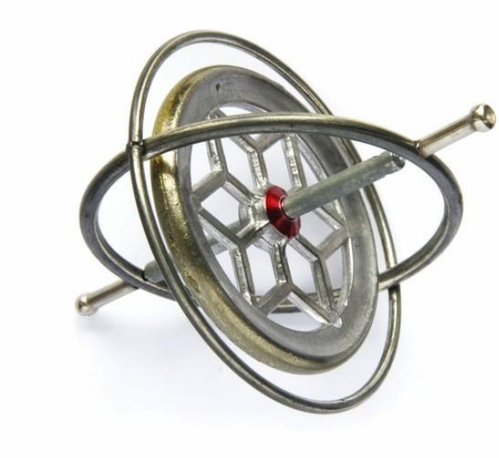
2.3 Gyroskop

Je přístroj, který pomocí setrvačníku zachová směr osy své rotace, tedy zařízení, které dokáže určit svoji orientaci v prostoru. Používá se v letectví, jako umělí horizont, v lodní dopravě, ke stabilizaci lodí, ve vesmíru, například pro orientaci družice, v navigaci raket, ale také se používá ve formě hraček v podání například „káči“ či dnes oblíbeného cvičícího přístroje, Powerball.

2.3.1 Princip

Princip gyroskopu je založen na zachování momentu hybnosti, ten se snaží zachovat svoji polohu v prostoru. Přesnost gyroskopu je dána stabilitou a udržením otáček. Obvykle je setrvačník uložen v takzvaných Cardanových závěsech (Obrázek 4), aby měl tři stupně volnosti. Pomocí gyroskopů se měří úhlová rychlost, to znamená údaj o tom, jak se měřený objekt rychle otáčí, v jednotkách stupňů za sekundu. Rotaci je možné typicky měřit vzhledem

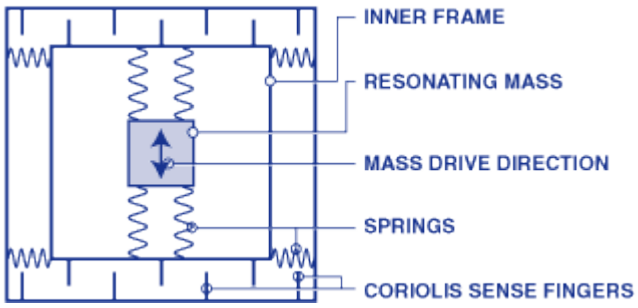
k jedné ze tří os z, y, x, někdy označované jako svislá (kolmá) osa (yaw axis), příčná osa (pitch axis) a podélná osa (roll axis).



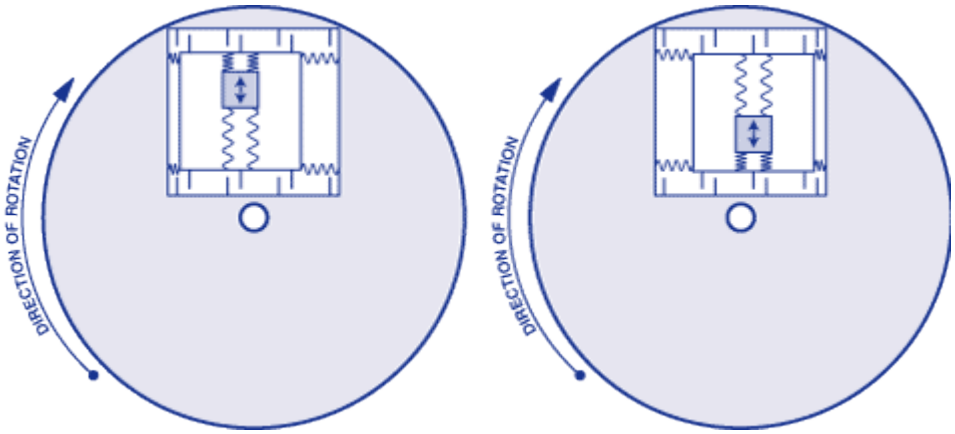
Obrázek 4 - Gyroskop v Cardanových závěsech

2.3.2 Princip gyroskopu MEMS

Je založen na vibrujícím tělísku upevněném pomocí pružin v rámu, směr pohybu tělíska musí být vždy kolmý k ose otáčení, potom na tělísko působí Coriolisova sila. Velikost Coriolisovy sily je úměrná úhlové rychlosti otáčení, ta způsobuje stlačení vnějších pružin rámu a způsobí vzájemný posuv měřících plošek (Coriolis sense fingers) fungující jako elektrody vzduchových kondenzátorů (Obrázek 5). Výstup je tedy změna kapacity úměrná úhlové rychlosti otáčení °/s.



Obrázek 5 - Tělísko uchycené v rámu



Obrázek 6 - Příklad funkce struktury snímače gyroskopu při rotaci

Seznam využití MEMS gyroskopů:

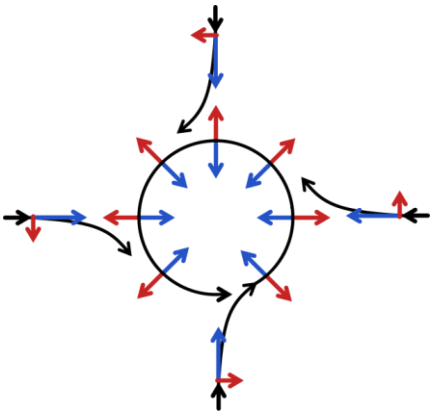
- Detekce a měření rotačního pohybu
- Stabilizační jízdní systémy automobilů
- Zpřesňování pozice systémů GPS
- Stabilizace obrazu a předmětů
- Zjišťování změny polohy, detekce pohybu
- Měření setrvačnosti
- Detekce převrácení, např. automobilu
- Navádění a řízení raket, letadel, robotů apod.
- atd.

2.3.3 Coriolisova sila

Je setrvačná síla působící na tělesa v neinerciální vztažné soustavě, patří mezi zdánlivé síly. Velikost Coriolisovy síly je dána úhlovou rychlostí ω a velikostí vektoru rychlosti tělesa **v**. Proto je ze vztahu Coriolisovy síly možné určit velikost a směr síly podle pravidel pro vektorový součin, kde α je úhel mezi vektorem úhlové rychlosti otáčející se soustavy a vektorem rychlosti tělesa. Směr vektoru Coriolisovy síly je kolmý na vektory v a ω a tvoří s nimi pravotočivý systém (orientaci lze určit pomocí pravidla pravé ruky) (2.1).

$$F_c = 2 \cdot m \cdot v \times \omega \qquad \textbf{(2.1)}$$

Coriolisova síla ovlivňuje mnohé síly na naší planetě. Nejznámější je ovlivňování dynamiky oceánů a atmosféry. Na Obrázku 7 máme schematické znázornění proudění vzduchu okolo tlakové níže na severní polokouli. Sílu způsobenou rozdílem tlaku znázorňují modré šipky, Coriolisovu sílu (vždy kolmou k rychlosti) červené šipky [8]. Také v balistice musíme s Coriolisovou sílou počítat, při výpočtu trajektorie na dlouhou vzdálenost.



Obrázek 7 - Působení Coriolisovy síly na proudění v tlakové níži

2.4 Akcelerometr

Je senzor pro měření statického nebo dynamického zrychlení. Dále dokáže měřit odstředivé i setrvačné síly. Používá se pro zjištění pozice předmětu, jeho naklonění nebo vibrací. Díky těm to schopnostem má veliké množství uplatnění v mnoha aplikacích, například:

- Měření naklonění ploch a předmětů
- Detekce a monitorování nárazů a vibrací
- Měření zrychlení a brzdění
- Inerciální navigační systémy
- Ovládání multimediálních zařízení
- atd.

2.4.1 Kapacitní akcelerometr

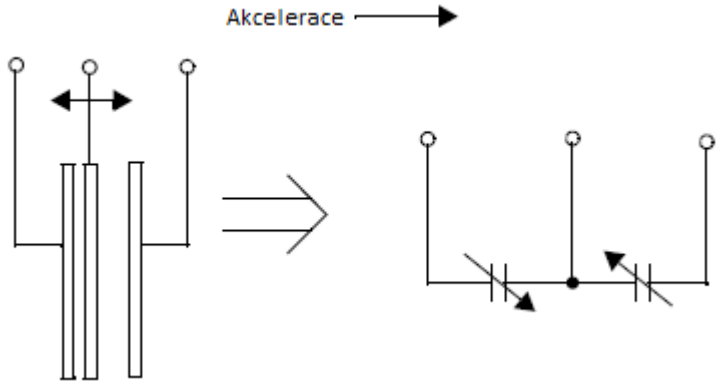
Kapacitní akcelerometr funguje jako deskový kondenzátor s proměnou kapacitou. Vyrábí se technologii MEMS, z toho vyplívá, že samotný integrovaný senzor je vlastně povrchová mikromechanická polykřemíková struktura (nosník, pružiny, pevné úchyty) "plovoucí" na povrchu křemíkového monokrystalu. Křemíkové pružiny umožňují pohyb celé mechanické struktury po povrchu monokrystalu a zároveň poskytují mechanický odpor síle vzniklé zrychlením.

Zjednodušeně je kapacitní akcelerometr tří vývodový proměnný kondenzátor s volně pohyblivou prostřední elektrodou. Při zrychlení se prostřední elektroda vychýlí (Obrázek 8), tím dojde ke změně kapacity, která je úměrná velikosti zrychlení.

$$C = \varepsilon \frac{S}{d} \tag{2.1}$$

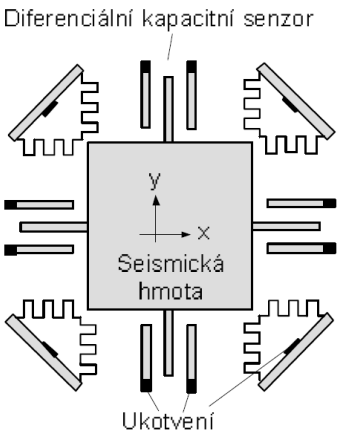
Kde:

- C - Kapacita kondenzátoru [F]
- S - plocha elektrod kondenzátoru [m^2]
- d - vzdálenost mezi elektrodami [m]
- ε - Permitivita [$F.m^{-1}$]



Obrázek 8 - Zjednodušený princip kapacitního akcelerometru

Takové to akcelerometry by byli použitelné pro měření zrychlení jen v jedné ose. Kapacitní akcelerometry se, ale vyrábí i pro 2 a tří osy. Ukázka vnitřní struktury 2D akcelerometru je na Obrázku 9.

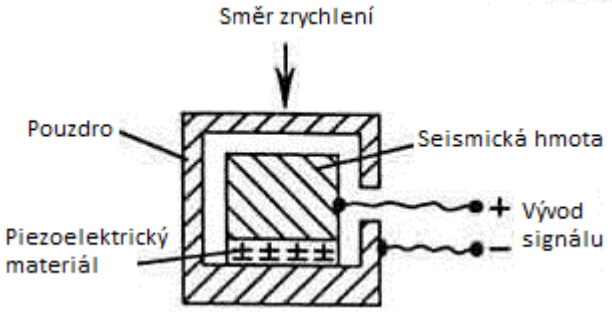


Obrázek 9 - Struktura 2D kapacitního akcelerometru

2.4.2 Piezoelektrické akcelerometry

Při mechanickém namáhání vzniklém akcelerací se na piezoelektrickém materiálu generuje elektrický signál, který je úměrný mechanické námaze.

Senzor se skládá z piezoelektrického materiálu, ten slouží jako převodník zrychlení na elektrický náboj. Tento materiál je pevně ukotven na pevnou podpěru senzoru, pouzdro. Druhá strana piezoelektrického materiálu je připevněna takzvaná seismická hmota (Obrázek 10).



Obrázek 10 - Struktura Piezoelektrického akcelerometru

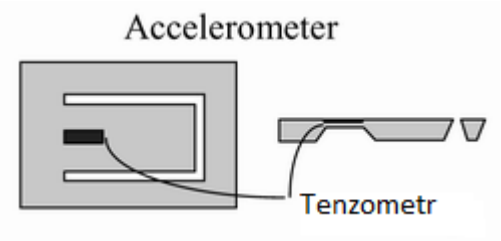
Pro měření náboje se používá buď externí elektronika s vysoko vstupní impedancí anebo častěji používáno vnitřní elektroniky převádějící náboj ze snímače na napěťový výstup s nízkou impedancí. Díky jednoduché konstrukci pak můžeme senzor připojit na jednoduchý vyhodnocovací obvod.

Jestliže senzor je vystaven zrychlení nebo otřesům, působí na piezoelektrický element síla, která způsobí vygenerování náboje, tedy napětí na výstupu senzoru. Podle Newtonova zákona je tato síla úměrná zdroji zrychlení a seismické hmotě. Jelikož seismická hmota je konstantní piezoelektrický efekt tak generuje na výstupu elektrický náboj q, který je úměrný působící síle, tedy akceleraci působící na senzor a celé soustavy, ke které je senzor připevněn.

Nevýhoda piezoelektrických akcelerometrů je jejich nemožnost použití pro frekvence nižších než 0,1Hz tedy nemohou být použity pro konstantní zrychlení.

2.4.3 Piezorezistivní akcelerometry

Ty to akcelerometry využívají piezorezistivní křemíkový materiál, který je připevněn na nosník, ten se vlivem pohybu ohýbá a sním i piezorezistivní křemíková destička, tenzometr (Obrázek 11). Ten díky ohybu mění svůj odpor, který měříme.



Obrázek 11 - Piezorezistivní akcelerometr

Piezorezistivní akcelerometry mají výhodu proti piezoelektrickým v tom, že je možné s nimi měřit stálou akceleraci, tedy změnu frekvence od 0Hz.

V integrovaných piezorezistivních akcelerometrech využíváme sítě vyleptaných piezoelektrických snímačů, které jsou zapojeny do Wheatstonova můstku.

Dnešní požadavky na piezorezistivní akcelerometry jsou:

- malá velikost
- citlivost na zrychlení nižší než jedna setina gravitačního zrychlení
- velká šířka pásma
- stabilní výstup přes celý rozsah provozních teplot
- netečné pouzdro
- velká přesnost
- lineární výstup
- senzor by měl být citlivý pouze na požadovanou složku zrychlení
- vysoká spolehlivost
- nízká cena
- snadná společná integrace senzoru a elektroniky na jednom čipu

3 Elektromotory

Elektromotor je elektrický stroj, který přeměňuje elektrickou energie na energii mechanickou. Nejčastěji se využívají točivé elektromotory, ale existuji i netočivé, lineární elektromotory.

3.1 Princip

Základní princip většiny elektromotorů je založen na působení magnetického pole. Nejčastěji se používá Lorentzův zákon síly (3.1). Na vodič v magnetickém poli působí síla, která je úměrná kolmé složce magnetické indukce. Dále se používají magnetické vlastnosti materiálu. Například přitahování feromagnetického materiálu a elektromagnetu, toto se využívá třeba u krokových motorů.

$$F = q(E + v \times B) \tag{3.1}$$

Kde je:

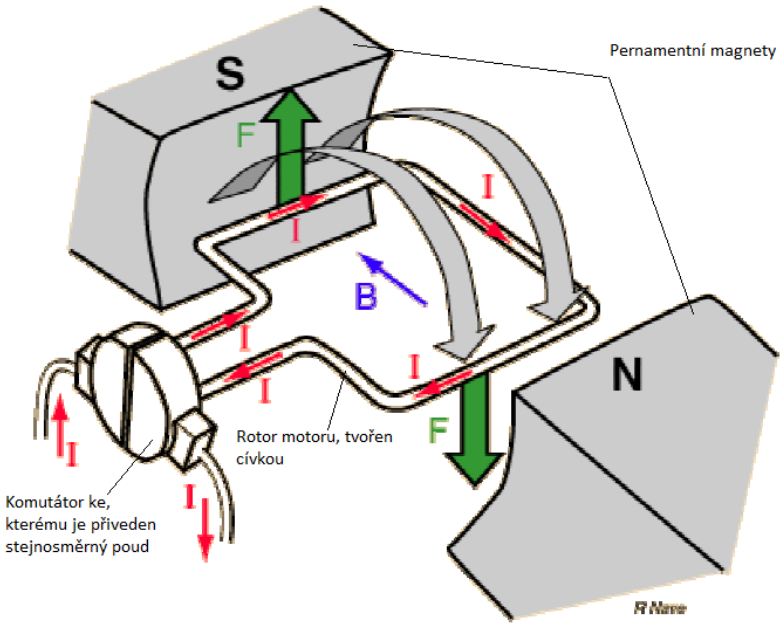
- F síla [N]
- q elektrický náboj [C]
- v rychlost náboje [$m.s^{-1}$]
- E intenzita elektrického pole [$V.m^{-1}$]
- B magnetická indukce [T]

Při konstrukci se krom Lorentzovy síly musí počítat s tím, že se vodič pohybuje v magnetickém poli, tedy vzniká na něm elektrické napětí.

3.2 Stejnosměrné (kartáčové) motory

Motory fungující na stejnosměrné napětí se skládají ze tří částí, statoru, rotoru a komutátoru. Stator je pevná část, nepohyblivá, kterou obvykle tvoří permanentní magnet, ale může být tvořen i dynamoplechy s držákem na cívku, která vytváří elektromagnetické pole. Rotor je, jak už název napovídá, rotující část, která je vždy tvořena cívkami, které vytváří elektromagnetické pole. Toto pole pak s interakcí se statorovým polem vyvolá pohyb. Elektrický proud je přivede na cívky rotoru přes rotační přenosové ústrojí, tak zvaný komutátor. Ten je rozdělen na jednotlivé lamely, ke kterým jsou připojené cívky rotoru.

Na rotující lamely se přivádí elektrické napětí pomocí uhlíků, které jsou k nim přitlačované pomocí pružinek (Obrázek12).



Obrázek 12 - DC motor

Hlavní nevýhodou stejnosměrných kartáčových motorů je nízká životnost, která je daná přenosovým ustrojím, které se vlivem otáčení a hlavně jiskřením na hranách opotřebovává a zvyšuje se elektrický odpor a tím zmenšuje elektrický proud a tudíž výkon celého motoru. Kvůli jiskření je též omezena možnost použití, hrozí riziko vznícení ve výbušném prostředí. Dále je také jiskření velkým zdrojem elektromagnetického rušení.

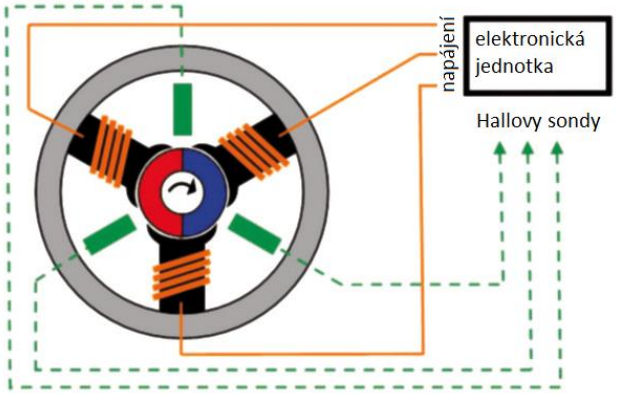
Výhodou je nízká pořizovací cena, jednoduchost řízení pomocí změny budícího napětí a lineární závislost otáček na velikosti budícím napětí.

3.3 Bezkartáčové stejnosměrné (BLDC) motory

Jsou synchronní motory napájené stejnosměrným napětím. Mechanický komutátor je zde nahrazen elektronickým, který je tvořen integrovaným měničem. U BLDC motorů je rotor tvořen permanentními magnety a na stator jsou upevněny cívky.

Elektronický komutátor přepíná signál mezi jednotlivými cívkami statoru, tedy nahrazuje mechanický komutátor. Pomocí zpětné vazby se zjistí poloha motoru. U malých motorů jsou to většinou Hallovy sondy, ty se někdy v jednodušších aplikacích dají nahradit činností elektronického systému. Použití enkodéru nebo rezolveru by bylo pro malé motory drahé.

Zjištěný úhel natočení se pošle do mikroprocesoru, který ji vyhodnotí a vygeneruje data pro sepnutí výkonových FET-tranzistorů (Obrázek 13).



Obrázek 13 - BLDC motor

Výhodou BLDC oproti kartáčovým stejnosměrných motorů je jejich účinnost, bezúdržbovost. Díky elektrické komutaci nevzniká jiskření, a tudíž nevysílají takové elektromagnetické rušení jako motory s mechanickou komutací. Dále nemají takové nároky na chlazení, tedy motory můžou být úplně uzavřené, izolované a můžou být použity i v extrémních prostředích, například v prostorech kde hrozí výbuch plynu.

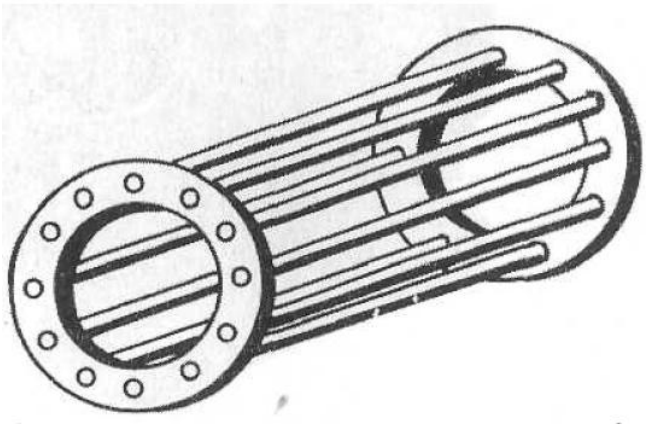
Nevýhodou je složitost řízení, které se musí provádět přes mikroprocesor. Z toho je odvozená další nevýhoda a to cena použití BLDC motoru, která stoupá právě o řídící jednotku.

3.4 Asynchronní motory

Asynchronní motor vynalezl Americký fyzik Srbského původu Nikola Tesla, pracuje na střídavý proud, je to jeden z nejrozšířenějších elektrických motorů a používá se jako pohon v různých odvětvích. Často se označuje jako indukční motor, protože tok energie mezi částmi motoru, tedy mezi statorem a rotorem, se tvoří pomocí elektromagnetické indukce. Napájecí napětí se používá podle konstrukce motoru a to jednofázové anebo trojfázové, díky tomu lze použít napájení ze sítě.

Každý asynchronní motor je tvořen dvěma částmi, statorem a rotorem, ty to dvě části jsou odděleny vzduchovou mezerou. Na stator i rotor jsou navinuty vinutí, Statorové vynutí je obvykle připojeno k napájení střídavým proudem a na rotorové vynutí se pak, pomocí elektromagnetické indukce, naindukuje proud jako u transformátoru.

Nejrozšířenějším asynchronním motorem je motor třífázový s kotvou nakrátko (Obráze14). Jeho hlavními výhodami jsou jednoduchost, spolehlivost a takřka bezúdržbová činnost. Vyrábí se s výkonem od několika wattů až do desítek megawattů a s velkým rozsahem otáček od desítek otáček za minutu až po statisíce otáček za minutu. Pro jeho rozběh stačí připojit k třífázovému proudu, tedy do sítě. Problémem může dělat vzniklý proudový náraz, ten může činit i sedmínásobek jmenovitého proudu. Snaha o zmenšení záběrového proudu a možnost regulace motoru vedla k úpravě rotoru a vznikl rotor s takzvanou kroužkovou kotvou. Tím zanikla jeho jednoduchost, ale vznikla možnost stupňové regulace otáček. Až díky rozvoji v elektrotechniky a regulace se podařilo odstranit problémy s kmitočtovým řízením rychlostí asynchronních motorů.



Obrázek 14 - Klec nakrátko

3.5 Krokové motory

U některých zařízení potřebujeme pohon, který dokáže přesně nastavit polohu a v této poleze setrvat i přes působení vnějších sil, které na pohon působí. Typickým zařízením, ve kterém se tento druh pohonu používá, je inkoustová tiskárna, kde potřebujeme přesně nastavit polohu tiskové hlavy. Dále můžeme zmínit i obráběcí stroje řízené počítačem, kde je potřeba nejen nastavit přesnou polohu, ale i udržet ji, když na obráběcí nůž působí obráběný materiál.

Výhodami krokových motorů jsou tedy možnost nastavení polohy a její udržení. Nevýhodami pak nutnost stálého proudu, i když se motor ne pootáčí, v nízkých rychlostech se motor plynule neotáčí, ale otáčí se trhaně. A nevýhodný je i poměr výkonu, respektive krouticího momentu, k hmotnosti motoru. I cena je vyšší, když ji porovnáme se stejnosměrnými motory.

Stator krokového motoru je tvořen určitým počtem pólů s navinutými cívkami. Rotory dělíme na aktivní a pasivní. Pasivní rotor je rotor, který je tvořen z plechů feromagnetického materiálu nalisovaných na hřídel rotoru. Aktivní rotor je tvořen permanentním magnetem buď radiálně, nebo axiálně usazeným. Pasivní rotor je nejjednodušší tedy i nejlevnější, ale mají nejvyšší rozběhový kmitočet, desítky až stovky Hertz, a malý provozní moment. Aktivní rotory s radiálně usazeným magnetem mají vyšší rozběhový kmitočet, jednotky až desítky kHz, ale zase mají velkou velikost kroku a stále malý provozní moment i když o něco vyšší než u pasivních rotorů. Nejpoužívanějším je tedy aktivní rotor s axiálně umístěným permanentním motorem, který má podobný rozběhový kmitočet jako rotor s radiálním magnetem, ale vyšší provozní moment.

Řízení krokových motorů se provádí buď unipolárně, nebo bipolárně, při unipolárním řízení se napájejí cívky vždy stejným napětím a k nim se přitáhne opačný magnetický pól rotoru, než se tvoří na cívce. Ten to způsob je nejjednodušší, stačí jeden tranzistor na každou cívku, a má nejmenší odběr, ale poskytuje nejmenší krouticí moment. U bipolárního řízení se napájejí opačným napětím cívky ležící naproti sobě, a tedy u rotoru jsou přitahovány oba póly. Nevýhodou je, že pro řízení jsou potřeba dva H-můstky, ale má větší krouticí moment. Další dělení řízení je na jednofázové, kde se napájí jen jedna cívka, v případě s bipolárním řízením by to byla dvojce cívek s opačnými póly. A dvoufázové kde se napájí stejným napětím dvě sousední cívky a pól rotoru je přitahován mezi ně. Nakonec tu máme řízení plným a polovičním krokem, kde u plného kroku využíváme jednofázové nebo dvoufázové řízení a u polovičního jejich kombinaci, takže střídáme krok jednofázového a dvoufázového řízení, tím nám vznikne dvojnásobek kroků.

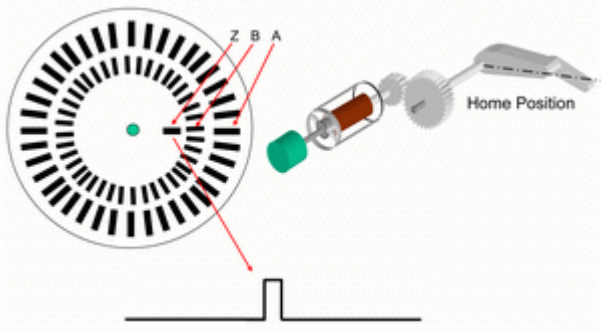
3.6 Senzory pro zjištění pohybu a polohy motoru

V mnoha aplikacích potřebujeme znát rychlost otáčení motoru, počet otáček za minutu, anebo úhel natočení motoru. Proto zavádíme zpětnou vazbu z motoru a to zajišťují různé senzory, enkodéry. Rozlišujeme dva základní druhy enkodérů, inkrementální a absolutní.

3.6.1 Inkrementální enkodéry

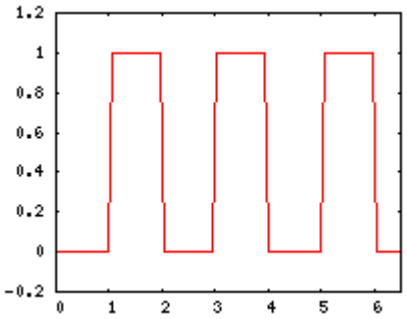
Inkrementální enkodéry se vyrábí buď magnetické, anebo optické. S jednoduchým magnetickým enkodérem se můžeme setkat například u tachometru na jízdním kole, zde je

magnet přidělán do drátů kola, snímač je přidělán na vidlici tak, že při otáčení kola se míjejí. Ty to snímače fungují na principu Hallovy sondy. Častěji jsou používané optické senzory, které se rozdělují na transmisivní a reflexní. Transmisivní optické enkodéry mají vysílač, který vysílá optický signál přes kotouč s průsvitnými mezerami a na druhé straně přijímač který signál přijímá. Tento způsob se používá například u kuličkové myši kde pohyb je přenášen na kuličku a s té na dvojic hřídelí s tím to kotoučem. Reflexní enkodéry mají vysílač a přijímač na stejné straně a kotouč je tvořen lesklými, tedy odrazovými, a matnými proužky. Reflexní enkodéry jsou hlavně používány pro přímé měření otáček kola nějakého stroje, zde je kotouč přímo přilepen k snímanému kolu. Někdy se k fázově posunutým obdélníkům přidává ještě jeden signál, takzvaně nulový kanál, je to jeden obdélník, jak je vidět na Obrázeku 15, kde „A“ je obdélníkoví signál, „B“ je fázově posunutý signál a „Z“ je nulový kanál. Ten to obdélník se používá k měření úhlu natočení podobně jako u absolutních enkodérů. Nevýhodou je, na rozdíl od absolutních, že po vypnutí a zapnutí nemůže zjistit ihned úhel natočení, ale nejdřív musí najít nulový kanál.

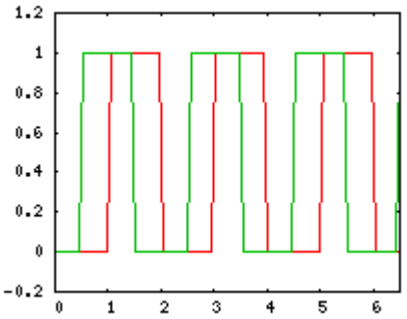


Obrázek 15 - Inkrementální enkodér

Přiměření s optickými enkodéry získáváme obdélníkový signál, který vyplívá z matných a lesklých ploch, nebo mez v kotouči. Pomocí těchto obdélníků zjistíme rychlost a počet otáček (Obrázek16), ale nezjistíme směr otáčení. Abychom mohli zjistit směr otáčení, přidává se k enkodéru ještě jeden přijímač, ten je proti prvnímu fázově natočen, nejlépe o 90° (Obrázek 17). Díky tomu získáme ještě jeden obdélník a po vyhodnocení fázového posuvu můžeme určit směr otáčení. V jednom směru bude rozestup 90° a v druhém 270°.



Obrázek 16 - Jeden signál z enkodéru



Obrázek 17 - Druhý o 90° fázově posunutý signál

3.6.2 Absolutní enkodéry

Absolutní enkodéry nám dokážou říct přesný úhel natočení. Levné absolutní enkodéry jsou dělané z potenciometru a údaj potom získáme pomocí A/D převodníku. Složitější absolutní enkodéry jsou optické, kde je údaj zakódovaný na kotouči, ten může být tvořen několika drahami, pro každou dráhu je potřeba samostatný snímač (Obrázek 18). Další variantou je, že všechny optické snímače jsou za sebou na kraji kotouče a informace o poloze je dána pomocí jednoznačného kódu. Velkou výhodou absolutních enkodéru je, že i povypnutí a zapnutí napájení můžeme i hned zjistit polohu, nevýhodou pak složitost zpracování údajů z enkodéru.

Obrázek 18 - Kotouč absolutního enkodéru

4 Praktické sestavení

Pro vytvoření balancujícího robota jsem se rozhodl, z množství snímačů polohy, využít kapacitní akcelerometr, který byl zvolen pro jeho možnost měření statických zrychlení, tedy možnosti určit úhel, a jeho nízkou cenu a dostupnost.

Jako řídící jednotku jsem použil osmi bitový mikropočítač, od firmy Atmel, Atmega88. Tento mikropočítač, komunikuje s akcelerometrem, pomocí sběrnice SPI. Z akcelerometru získáváme zrychlení, které se dále zpracovává v mikropočítači a tvoří se signál pro řízení motorů, tento signál je veden do integrovaného obvodu L298. L298 je dvojitý H-můstek, s kterým je možno řídit dva stejnosměrné motory pomocí PWM modulace.

4.1 Mikropočítač

Mikropočítač, nebo také mikrokontrolér je integrovaný obvod, který obsahuje mikroprocesor, paměť a vstupní a výstupní obvody. Často se zaměňuje pojem mikroprocesor za mikropočítač, přitom mikroprocesor je jen část mikropočítače, který vykonává sled aritmeticko-logických operací dle zadaného programu. Mikroprocesor je tedy jen výpočetní jednotka, která musí být doplněna, pro svoji funkčnost, o paměť, kde je uložen program, ale také paměť kam se budou ukládat data. Dále pro komunikaci s okolím potřebuje vstupní/výstupní obvody, puď pro číslicové signály, tedy například generátory PWM signálu nebo různé druhy sběrnic, jako SPI nebo I2C. Mikroprocesor může komunikovat i analogově, k tomu ale potřebuje A/D a D/A převodníky, které mikropočítač může také obsahovat.

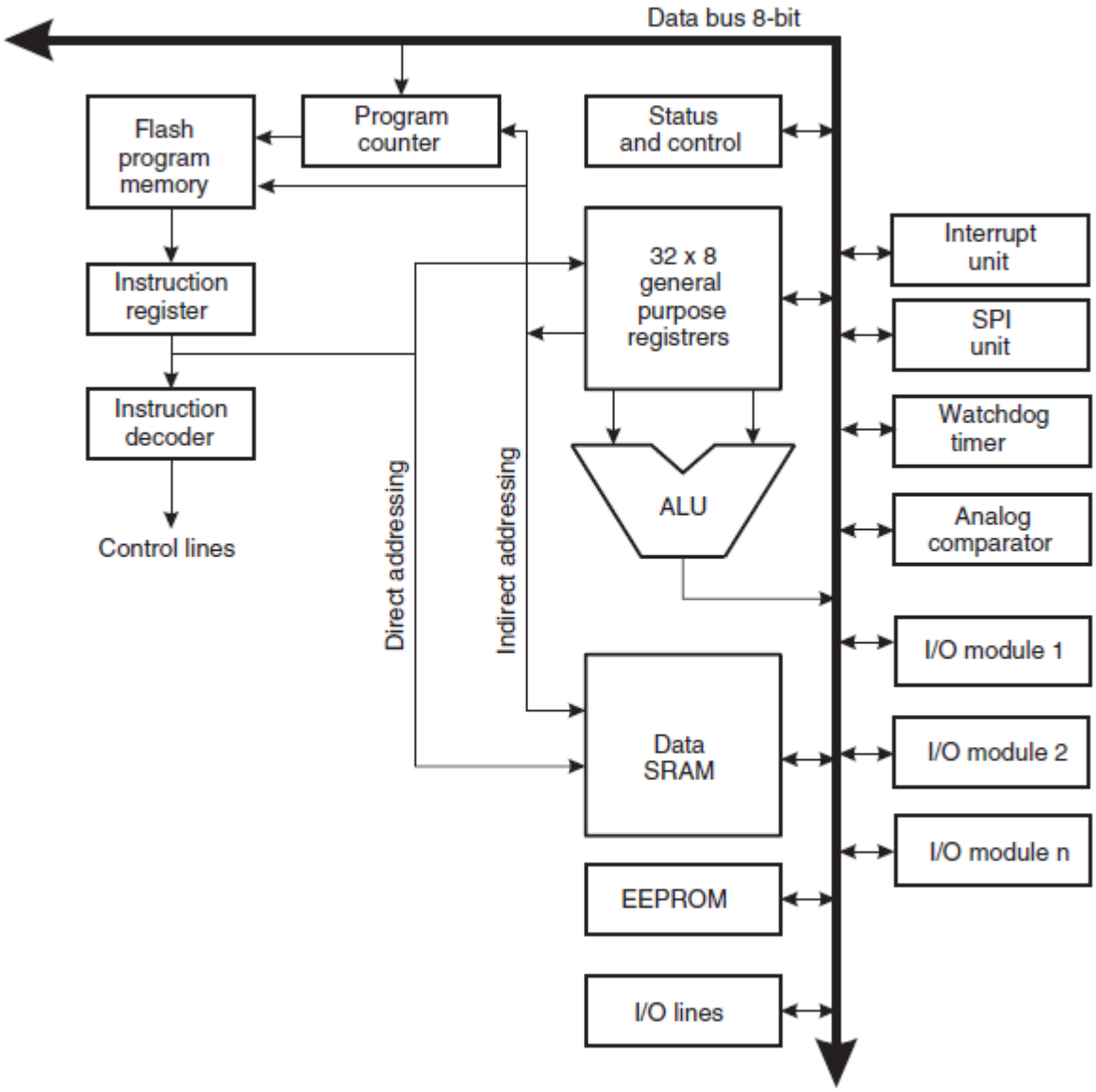
V této práci je mikropočítač použit jako hlavní řídící jednotka, která díky externím senzorů zjišťuje aktuální polohu a vytváří signál pro motory, aby udržely stabilní polohu. Pro tuto činnost byl vybrán mikrokontrolér ATmega88.

4.1.1 ATmega88

Jedná se o mikrokontrolér z rodiny AVR od firmy Atmel. Je vytvořen harvardskou a RISC architekturou. Harvardská technologie znamená, že má oddělenou paměť pro program a pro data, tyto paměti, mohou mít rozdílnou velikost. Díky paralelnímu přístupu se zrychlí chod celého mikropočítače. RISC je označení procesoru s redukovanou instrukční sadou, tady

mikroprocesor obsahuje jen jednoduché, vysoce optimalizované strojové instrukce. Tato optimalizace má jednoduší hardware a rychlejší procesor při stejném taktu, nevýhodou jsou nároky na rychlost pamětí a delší a komplexnější program. Firma Atmel u svého mikrokonrtoléru ATmega88 popisuje, že architektura RISC je efektivnější a až desetkrát rychlejší než konvenční CISC.

ATmega88 obsahuje 8 kBajtů Flash paměti, 512 Bajtů EEPROM a 1 kBajtů RAM paměti. Tyto paměti pracují v režimu pipeling, tedy zatím co jedna instrukce se provádí v mikroprocesoru, další se přesouvá z paměti programu. Mikroprocesor komunikuje s pamětmi a ostatními periférierni pomocí 8 bitové sběrnice.



Obrázek 19 - Vnitřní architektura ATmega88

Mikrokontrolér ATmega88 je vybaven vnitřním RC oscilátorem. Z tovární výroby je tento oscilátor kalibrován na 8MHz při napětí 3V a teplotě 25°C. Uživatelská kalibrace je mezi 7,3 až 8,1MHz při napětích od 2,7 do 5,5V a rozsahu teplot od -40 do +85°C. ATmega88 má i jiné možnosti připojení hlavního hodinového signálu. Mikropočítači můžeme připojit externí hodinový signál, nízkonapěťoví krystaloví oscilátor, anebo využít vnitřní 125KHz RC oscilátor. Výběr oscilátoru se provádí pomocí CKSEL pojistky.

Výběr zařízení hodin	CKSEL3..0
Low power crystal oscillator	1111-1000
Full swing crystal oscillator	0111-0110
Low frequency crystal oscillator	0101-0100
Internal 128kHz RC oscillator	0011
Calibrated internal RC oscillator	0010
External clock	0000
Reserved	0001

Tabulka 1 - Výběr použití hodin

4.1.2 Vlastnosti ATmega88 pouzdro 32MLF dle datasheetu:

- 8-bitový mikrokontrolér
- Pokročilá RISC architektura, obsahuje 131 instrukcí, většina zabere jen jeden takt
- Vysoko odolné bez-napěťové paměti
- 8 KB paměti pro program
- 512 B EEPROM
- 1KB vnitřní SRAM
- Počet zapisovacích/mazacích cyklů: 10000 flash, 100000 EEPROM
- Programovací zámek pro zabezpečení systému
- Vlastnosti periferii

    - Dva 8-bitové časovače/čítače s odděleným děliče a režimem porovnávání
    - Jeden 16-bitový čítač/časovač s odděleným děličem a s režimy porovnávání a snímaní
    - Šest PWM kanálů
    - 8-kanálový 10-bitový A/D převodník
    - Programovatelný sériový USART
    - Master/Slave SPI sériové rozhraní
    - Bitově orientované dvou vodičové rozhraní kompatibilní s I2C
    - Programovatelný watchdog s vlastním oscilátorem
    - Možnosti přerušení a buzení ze změny na PINu
- Speciální obvody mikrokontroléru
    - Vnější a vnitřní zdroje přerušení
    - Interní kalibrovatelný oscilátor
- Pět režimů spánků:
    - Idle,
    - ADC redukce šumu,
    - Úspora energie,
    - Vypnuté napájení
    - Standby
- 23 programovatelných vstupně/výstupních linek
- 32 nožiček na pouzdru
- Operační napětí:
    - 2,7V – 5,5V
- Rozsah teplot:
    - -40°C do 85°C

Pro moji práci bude použito z tohoto mikroprocesoru čtyř PWM kanálů pro řízení motorů a SPI sběrnice pro komunikaci s akcelerometrem a programování mikroprocesoru.

4.2 Akcelerometr

K detekci náklonu byl díky své dostupnosti a nízké ceně zvolen akcelerometr od firmi Freescale Semicoductor s označením MMA7455L. Tento akcelerometr je tříosý kapacitní snímač, vyráběný technologii MEMS. Je vybaven teplotní kompenzací a filtrem odstraňujícím vysokofrekvenční složku. Akcelerometr je možné konfigurovat pro detekci zrychlení 0g přes

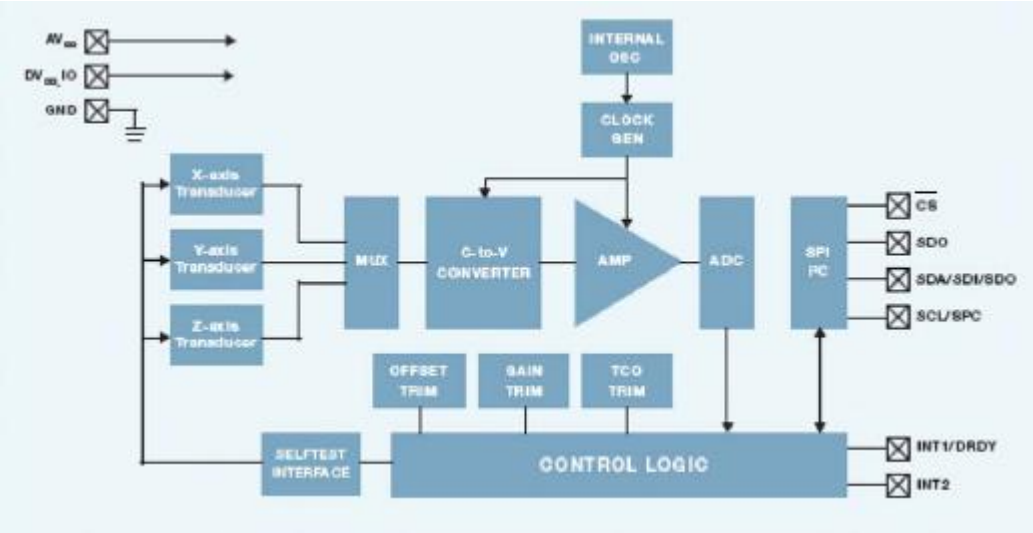
přerušení INT1 a INT2. Nulové zrychlení a citlivost jsou továrně nastaveny, ale kalibraci si může každý provést i sám pomocí 0g registrů. Citlivost je možné taky nastavit a to vetřech stupních, 2g, 4g a 8g.

4.2.1 Vlastnosti:

- Digitální výstup (I2C, SPI)
- 3mm x 5mm x 1mm LGA-14 pouzdro
- Self-Test pro Z-osu
- Nízké operační napětí: 2,4 V – 3,6 V
- Registry pro kalibraci
- Programovatelný práh pro přerušení
- Rozpoznání pohybu (vibrace, náraz, volný pád)
- Citlivost: 64 LSB/g při 2g a 8g v 10-bitovém režimu
- Volitelné citlivost: ±2g, ±4g, ±8g pro 8-bitový režim
- Schopnost nezničení prudkým nárazem (až 5000g)
- Nízká cena

4.2.2 Typické aplikace:

- Mobilní telefony, PDA: stabilita obrazu, detekce otočení, posun textu
- HDD: detekce pádu
- Přenosné počítače: detekce pádu, technologie proti krádeži
- Krokoměr
- Snímač pohybu



Obrázek 20 - Blokové schéma akcelerometru

Tabulka 2 - Maximální hodnoty

Veličina	**Symbol**	**Hodnota**	**Jednotka**
Maximální akcelerace (všechny osy)	g_{max}	5000	g
Analogové napájecí napětí	AV_{DD}	-0,3 do +3,6	V
Napájecí napětí dig. I/O pinů	DV_{DD_IO}	-0,3 do +3,6	V
Zkouška pádu	D_{drop}	1,8	m
Rozsah teplot při skladování	T_{stg}	-40 do +125	°C

4.2.3 Výběr rozsahu

Funkce g-Select umožňuje výběr mezi třemi rozsahy měření zrychlení. Pomocí Mode kontrol register ($16) může být změněno vnitřní zesílení a tím je možné pracovat s jinou citlivostí. Tuto citlivost můžeme kdykoliv změnit pomocí změny dvou GLVL bitů, ty se nacházejí v Mode control registru.

Tabulka 3 - $16: Mode Control Register (Read/Write)

D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0	**Bit**
-	DRPD	SPI3W	STON	GLVL[1]	GLV[0]	MODE[1]	MODE[0]	**Funkce**
0	0	0	0	0	0	0	0	**Standartně**

Tabulka 4 - Nastavení Rozsahu pomocí GLVL bitů

GLVL[1:0]	**Rozsah zrychlení**	**Citlivost**
00	8g	16 LSB/g
01	2g	64 LSB/g
10	4g	32 LSB/g

4.2.4 Pohotovostní režim

Využívá se pro úsporu energie, hlavně v přístrojích napájených bateriemi. Odběr proudu v pohotovostním režimu klesne na 2,5 mikroampér. V takto nastaveném akcelerometru je dovoleno přistupovat do registru, tedy číst a zapisovat přes I2C nebo SPI, ale neprobíhá žádné další měření. Pohotovostní režim se nastavuje v Mode kontrol registru pomocí dvou bitů.

Tabulka 5 - Nastavení režimu akcelerometru

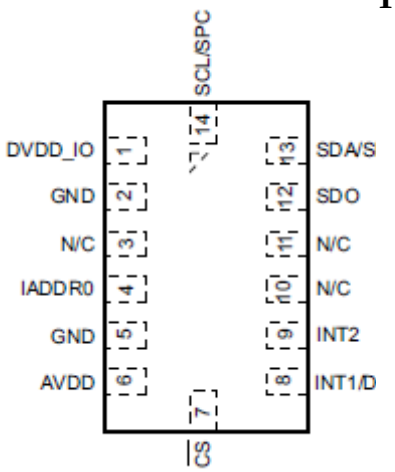
MODE[1:0]	**funkce**
00	Pohotovostní režim
01	Měřící režim
10	Detekování úrovně
11	Detekce pulsu

4.2.5 Měřící režim

V tom to režimu se provádí měření ve všech třech osách a je povoleno jakékoliv nastavení citlivosti. Přerušení pomocí detekce pulsu nebo prahové detekce jsou neaktivní. Vzorkovací frekvenci je možno nastavit, pomocí nastavení filtru na bitu DFBW, buď na 125 Hz s 62,5 Hz filtrem, nebo 250 Hz se 125 Hz filtrem. Ve standardním režimu se měří zrychlení na všech třech osách, ale lze jednotlivé osy vypnout a měřit jen na potřebných. Dále je možno měřit absolutní signál, pozitivní signál, nebo negativní signál. V měřícím režimu je možné detekovat volný pád.

4.2.6 Komunikace

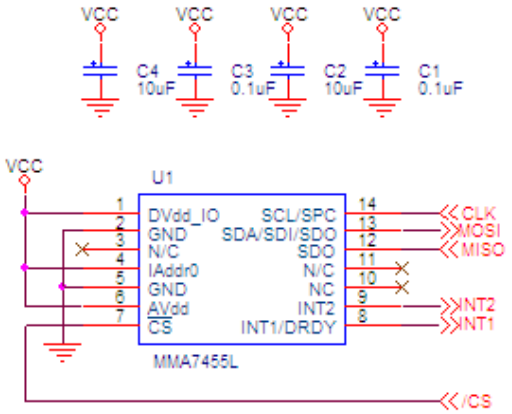
Akcelerometr MMA7455L je vybaven obvodem pro zpracování naměřených dat, tedy i A/D převodníkem. Zpracovaná data jsou pak posílána v digitální podobě. Pro komunikaci s akcelerometrem tu pak máme dva způsoby, dvě sběrnice, I2C a SPI.



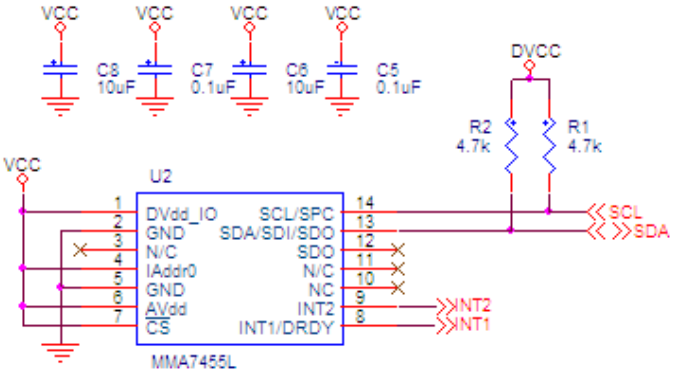
Obrázek 21 – Rozmístění pinů

Tabulka 6 - Popis pinů

Pin	Jméno pinu	popis	Status pin
1	DVDD_IO	Digitální napájení pro I/O	Vstupní
2	GND	Zem	Vstupní
3	N/C	Nepřipojeno	Vstupní
4	|ADDR0		Vstupní
5	GND	Zem	Vstupní
6	AVDD	Analogové napjení	Vstupní
7	|CS	Povlení SPI (0)/I2C (1)	Vstupní
8	INT/DRDY	První přerušení/Read Data	Výstupní
9	INT2	Druhé přerušení	Výstupní
10	N/C	Nepřipojeno	Vstupní
11	N/C	Nepřipojeno	Vstupní
12	SDO	SPI seriál data output	Výstupní
13	SDA/SDI/SDO	I2C seriál data(SDA), SPI seriál dara input(SDA), 3-wirw interface seriál data Output(SDO)	Open Drain/ Input/ Output
14	SCL/SPC	Seriál clock	vstupní



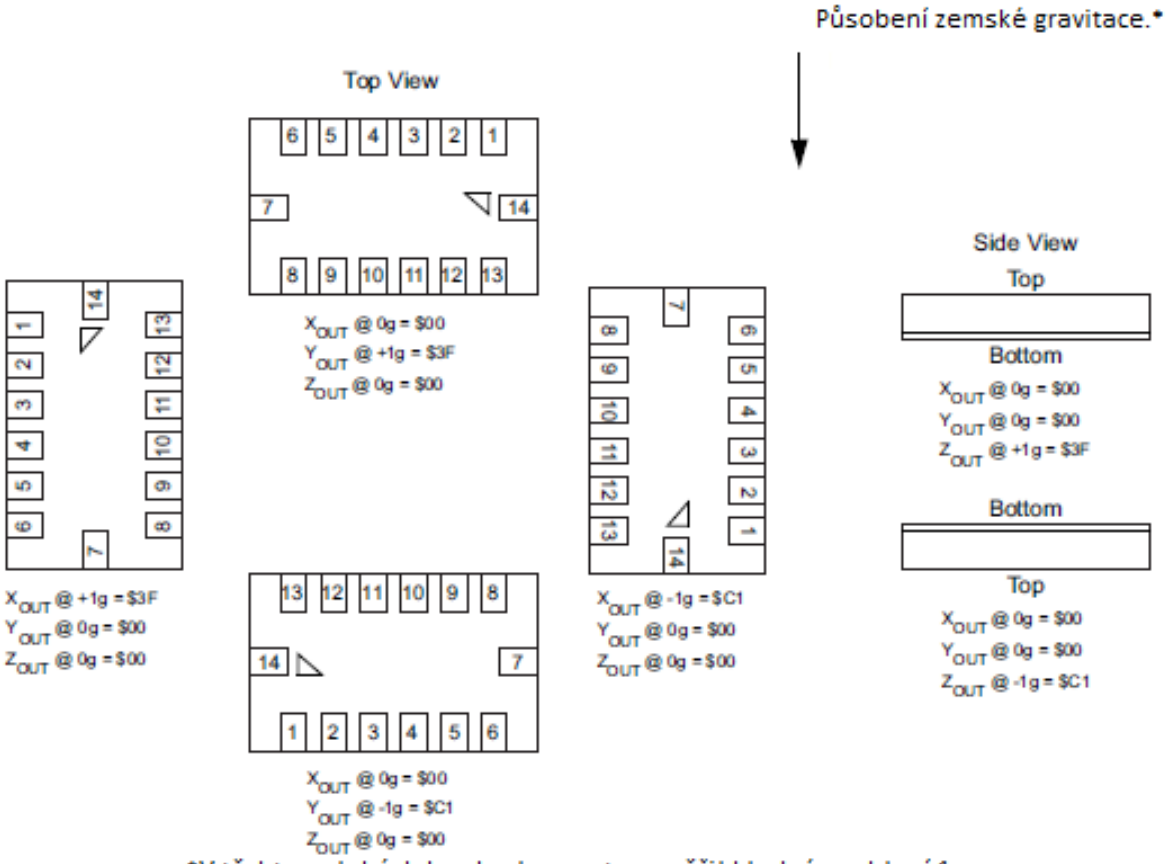
Obrázek 22 - Doporučené zapojení pro SPI



Obrázek 23 - Doporučené zapojení pro I2C

4.2.7 Orientace akcelerometru a odezva výstupu

V následujícím obrázku (Obrázek 24) jsou ukázány jednotlivé orientace ke gravitaci země při nulovém pohybu a odezva výstupu k nim.



Obrázek 24 - Orientace a hodnoty vůči zemi

V následující tabulce jsou naznačeny hodnoty na výstupu při určitých zrychlení a rozsahu snímaní.

Tabulka 7- Porovnání zrychlení a výstupu

Režim rozsahu	**Zrychlení**	**Výstup**
2g režim	-2g	$80
	-1g	$C1
	0g	$00
	+1g	$3F
	+2g	$7F
4g režim	-4g	$80
	-1g	$E1
	0g	$00
	+1g	$1F
	+4g	$7F

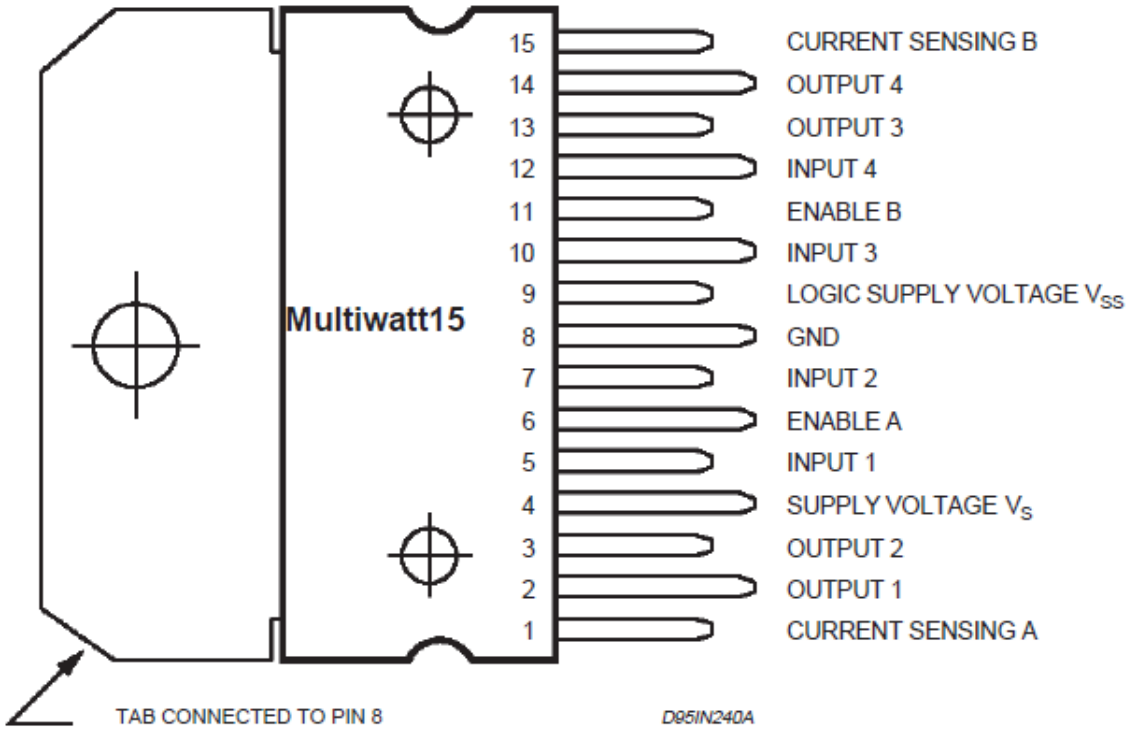
8g režim	-8g	$80
	-1g	$F1
	0g	$00
	+1g	$0F
	+8g	$7F

4.3 H-můstek

Pro řízení stejnosměrných motorů, pomocí PWM,byl vybrán dvojitý H-můstek od firmy STMicroelectronic s označením L298 v pouzdru Multiwatt15. Je to vysokonapěťový obvod s TTL logikou určený pro řízení induktivních zátěži, jako jsou relé, stejnosměrné a krokové motory.

Tabulka 8 - Maximální hodnoty

Označení	**Parametr**	**Hodnota**	**Jednotka**
V_s	Napájecí napětí	50	V
V_{ss}	Logické napájecí napětí	7	V
V_i,V_{en}	Vstupní a povolovací napětí	-0,3 do 7	V
I_o	Špičkový vstupní proud (každý kanál) - neopakovaně (t=100ms) - opakovaně (80%/t zap, -20%/t vyp, t_{zap}=10ms) -stejnosměrný provoz	 3 2,5 2	 A A A
V_{sens}	Sensing Voltage	-1 do 2,3	V
P_{Tot}	Celková ztráta energie (teplota pouzdra 75°C)	25	W
T_{op}	Provozní teplota	-25 do 130	°C
T_{stg},T_j	Skladovací teplota, přechodná teplota	-40 do 150	°C

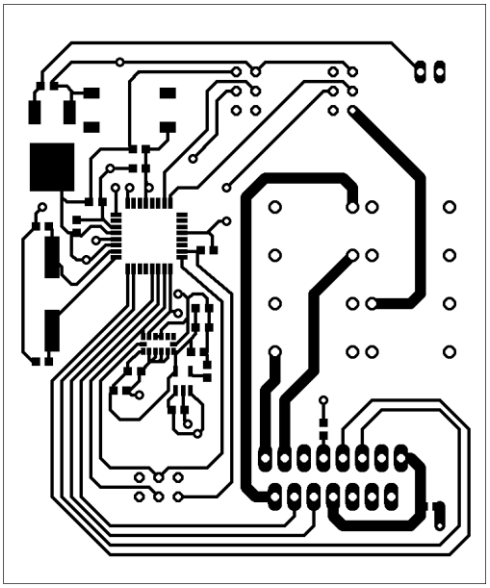


Obrázek 25 - Pouzdro Multiwatt 15 pro L298

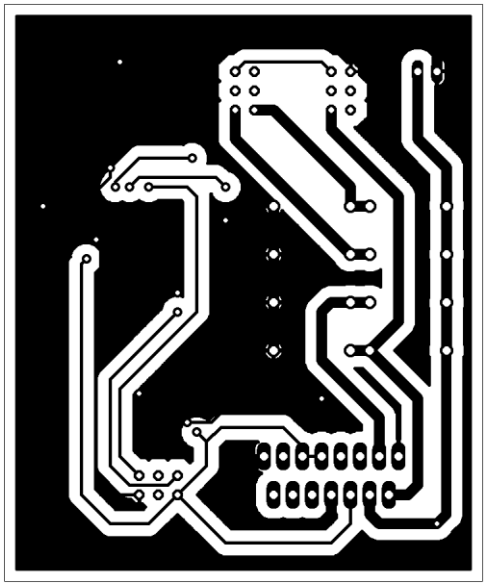
4.4 Návrh desky plošného spoje

Návrh desky plošného spoje byl vytvořen v programu EAGLE verze 6.2.0 od firmy CadSoft. Návrh jsem udělal na jednu desku s jedním napájením z baterie, které bude pomocí stabilizátorů upraveno pro jednotlivé součástky. Návrh tedy obsahoval dva stabilizátory, pro akcelerometr na 3,3V a pro ATmega88 na 5V. Bohužel až po vytvoření desky jsem zjistil, že mnou navržený obvod by měl problém s komunikací mezi akcelerometrem a mikrokontrolérem pomocí SPI sběrnice, proto byl pěti voltový stabilizátor nahrazen stabilizátorem na 3,3V a tudíž druhý stabilizátor byl vynechán a přemostěn tak, aby napájení fungovalo i bezpruhého stabilizátoru.

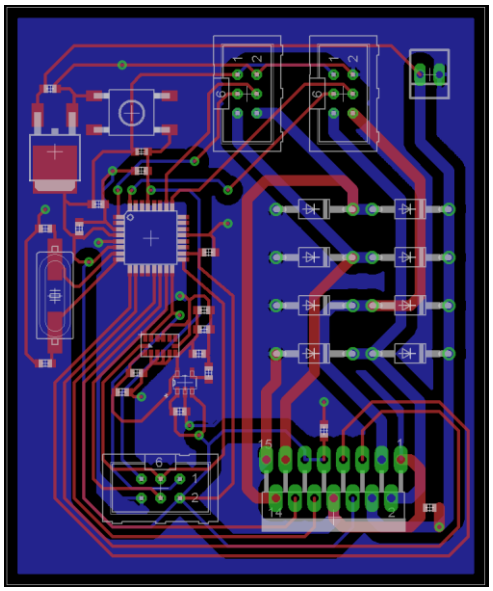
Celý návrh je vytvořen na desce o rozměrech 6,3 mm na 7,6 mm. Součástky, které pracují s 3,3 V napětím jsou zvoleny jako SMD, ostatní, tedy integrovaný H-můstek součástky kolem něj jsou klasické. Všechny součástky jsou osazeny z vrchní, TOP, strany, kde nenachází taky nejvíce spojů na desce, druhá, BOTTOM strana je z většiny rozlitá polygonem, který je připojen na zem.



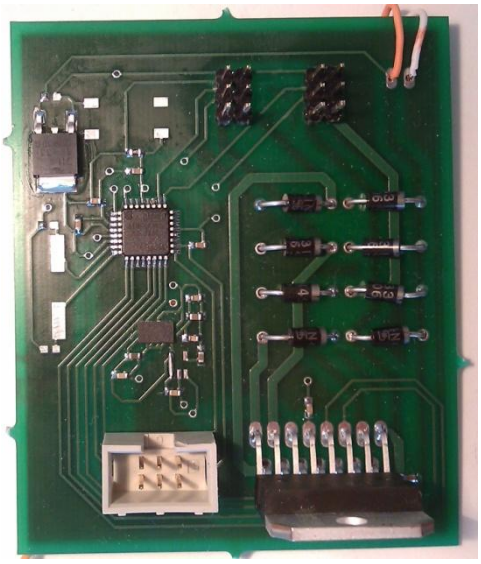
Obrázek 26 - Deska TOP



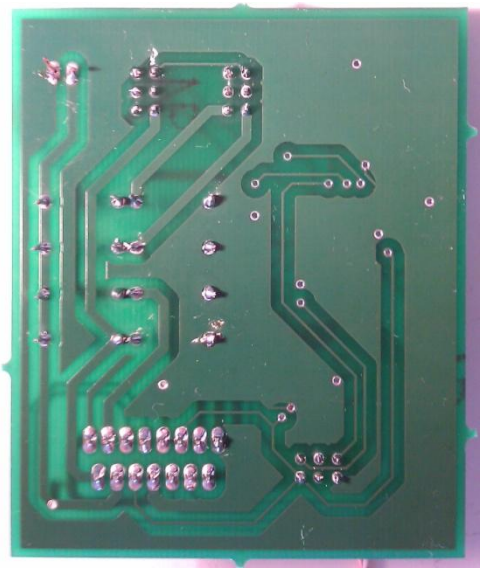
Obrázek 27 - Deska BOTTOM



Obrázek 28 - Model osazené desky



Obrázek 29 - Foto osazené desky (TOP)

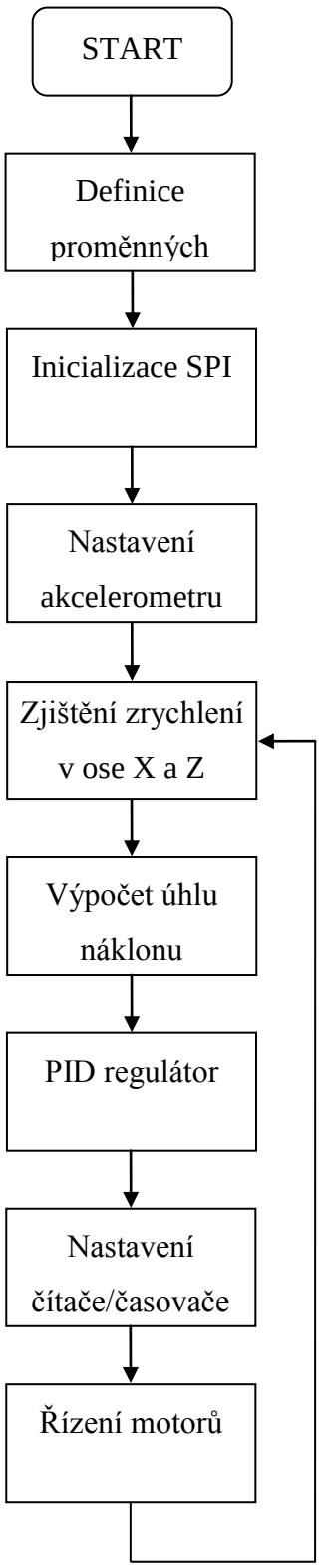


Obrázek 30 - Foto osazené desky (BOTTOM)

4.5 Programování

Samotný program pro mikrokontrolér AVR je psaný v jazyce C. Prostředí ve kterém jsem programoval je AVRstudio 4, které je volně dostupné od výrobce mikrokontrolérů, firmy Atmel. Překlad z jazyka C byl proveden pomocí zabudovaného překladačem GCC. Pro nahrání programu do paměti mikroprocesoru byl použit programátor AVRISP s rozhraním USB a 6 pinovým ISP konektorem. Tento programátor je rovněž od firmy Atmel.

4.5.1 Vývojoví diagram



Obrázek 31 - Vývojový diagram

4.5.2 Nastavení mikrokontroléru

V mikrokontroléru je potřeba nastavit potřebné registry pro PWM. K řízení dvou motorů je potřeba čtyř PWM kanálů, ty nastavíme pomocí registrů TCCR0A, TCCR0B, TCCR1A a TCCR1B. TCCR0A (Tabulka 9) a TCCR0B (Tabulka 10) jsou registry pro OC0A a OC0B PWM kanály. Zde se nastaví do jedničky bity WGM01 a WGM00 (Tabulka 13), které zajistí režim Fast PWM, dále bit COM0A1 (Tabulka 11), ten nastaví neinvertující režim pro OCOA výstup, a COM0B1 (Tabulka 12), který nastaví to samé pro OCOB. V TCCR0B se nastaví je bity CS2:0 (Tabulka 14) pro potřebný dělič frekvence.

Tabulka 9 - TCCR0A registr

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
0x24 (0x44)	**COM0A1**	**COM0A0**	**COM0B1**	**COM0B0**	-	-	**WGM01**	**WGM00**
Read/Write	R/W	R/W	R/W	R/W	R	R	R/W	R/W
Initial value	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabulka 10 - TCCR0B registr

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
0x25 (0x45)	**FOC0A**	**FOC0B**	-	-	**WGM02**	**CS02-**	**CS01**	**CS00**
Read/Write	W	W	R	R	R/W	R/W	R/W	R/W
Initial value	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabulka 11 - COM0A1:0 bity

COM0A1	**COM0A0**	**Popis**
0	0	Normální port, OC0A odpojen
0	1	WGM02=0: Normální port, OC0A odpojen WGM02=1: Změna logické úrovně na OC0A
1	0	Clear OC0A on compare match, set OC0A at BOTTOM, (neinvertující režim)
1	1	Set OC0A on compare match, clear OC0A at BOTTOM (invertujíví režim)

Tabulka 12 - COM0B1:0 bity

COM0B1	**COM0B0**	**Popis**
0	0	Normální port, OC0B nepřipojen
0	1	Rezervováno
1	0	Clear OC0B on compare match, set OC0B at BOTTOM, (neinvertující režim)
1	1	Set OC0B on compare match, clear OC0B at BOTTOM, (Invertující režim)

Tabulka 13 - WGM02:0 režim časovače/čítače

Mode	WGM02	WGM01	WGM00	Timer/counter mode of operation	TOP	Update of OCRx at	TOV flag set on[(1)(2)]
0	0	0	0	Normal	0xFF	Immediate	MAX
1	0	0	1	PWM, phase correct	0xFF	TOP	BOTTOM
2	0	1	0	CTC	OCRA	Immediate	MAX
3	0	1	1	Fast PWM	0xFF	BOTTOM	MAX
4	1	0	0	Reserved	–	–	–
5	1	0	1	PWM, phase correct	OCRA	TOP	BOTTOM
6	1	1	0	Reserved	–	–	–
7	1	1	1	Fast PWM	OCRA	BOTTOM	TOP

Tabulka 14 - Nastavení děliče

CS02	CS01	CS00	Description
0	0	0	No clock source (timer/counter stopped)
0	0	1	$clk_{I/O}$/(no prescaling)
0	1	0	$clk_{I/O}$/8 (from prescaler)
0	1	1	$clk_{I/O}$/64 (from prescaler)
1	0	0	$clk_{I/O}$/256 (from prescaler)
1	0	1	$clk_{I/O}$/1024 (from prescaler)
1	1	0	External clock source on T0 pin. Clock on falling edge.
1	1	1	External clock source on T0 pin. Clock on rising edge.

Při nastavování registru druhého čítače/časovače, TCCR1A a TCCR1B, se postupuje podobně, více v datasheetu proATmega88 **[15]** v kapitole 16-bit Timer/Counter1 with PWM.

Takhle bude vypadat kód v jazyce C pro nastavení registrů čítače časovače:

```
TCCR0A |=(1<<COM0A1)|(1<<COM0B1)|(1<<COM0B0)|(1<<WGM01)|(1<<WGM00);
TCCR0B |=(1<<CS01);
TCCR1A |=(1<<COM1A1)|(1<<COM1B1)|(1<<COM1B0)|(1<<WGM10);
TCCR1B |=(1<<WGM12)|(1<<CS11);
```

Dále je potřeba nastavit v mikrokontroléru registry sloužící pro SPI. SPI, je sériová, plně duplexní sběrnice, která spojuje dvě nebo více zařízení. Jedno zařízení má status Master, řídící zařízení, a ostatní Slave. Master generuje hodinový signál, výstup SCK, který se

rozvede do ostatních zařízení, pomocí tohoto signálu je přenos synchroní. Pro obousměrný přenos slouží dva vodiče MISO, pro příjem dat na řídící obvod, a MOSI, pro posílání dat řídícím obvodem. Posledním signálem je SS nebo také SSEL, slouží k výběru podřízeného obvodu.

Pro nastavení SPI v mikrokontroléru ATmega88 je potřeba nastavit MOSI, SCK a SS jako výstupy, MISO bude vstupní. V registru SPCR (Tabulka 15) nastavíme SPI enable (SPE) bit a jelikož mikrokontrolér budeme používat jako Master, nastavíme Master/Slave Select (MSTR) na jedničku. Dále pomocí bitů SPR1 a SPR0 (Tabulka 16) nastavíme potřebnou frekvenci sběrnice, dle datasheetu k MMA7455L by měla být frekvence nastavena na 8MHz, tedy budeme muset nastavit do jedničky SPR0 a v registru SPSR (Tabulka 17) ještě musíme nastavit bit SPI2X.

Tabulka 15 – SPCR registr

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
0x2C (0x4C)	**SPIE**	**SPE**	**DORD**	**MSTR**	**CPOL**	**CPHA**	**SPR1**	**SPR0**
Read/Write	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W
Initial value	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabulka 16 - Nastavení děliče

SPI2X	SPR1	SPR0	SCK frequency
0	0	0	$f_{osc}/4$
0	0	1	$f_{osc}/16$
0	1	0	$f_{osc}/64$
0	1	1	$f_{osc}/128$
1	0	0	$f_{osc}/2$
1	0	1	$f_{osc}/8$
1	1	0	$f_{osc}/32$
1	1	1	$f_{osc}/64$

Tabulka 17 - SPSR registr

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
0x2D (0x4D)	**SPIF**	**WCOL**	-	-				**SPI2X**
Read/Write	R/W	R/W	R	R	R	R	R	R/W
Initial value	0	0	0	0	0	0	0	0

Kód pro inicializaci SPI bude pak vypadat:

```
// nastavení MOSI, SCK a SS jako výstup
DDR_SPI = (1<<DD_MOSI)|(1<<DD_SCK)|(1<<DD_SS);
// povolení SPI, Master, nastavení hodin
SPCR = (1<<SPE)|(1<<MSTR)|(1<<SPR0);
SPSR = (1<<SPI2X);
```

4.5.3 Nastavení akcelerometru

Pro komunikaci s akcelerometrem pomocí SPI je potřeba aby |CS port akcelerometru byl připojen na nulu, zde je tento řešen přímím připojením na zem. Dále v Mode Control registru (Tabulka 3) je potřeba nastavit měřící režim, MODE1:0 (Tabulka 5), a nastavit rozsah zrychlení,GLVL1:0 (Tabulka 4). Pro tento účel bude stačit nastavit rozsah na 2g. Dále pro zjištění úhlu náklonu budeme potřebovat jen dvě měřící osy, takže jednu můžeme vypnout. Vypínání os se provádí v Control 1 registru (Tabulka 18), kde pomocí bitů ZDA, YDA a XDA se vypínají jednotlivé osy. Pro vypnutí osy nastavíme jedničku pro zapnutí nulu.

Tabulka 18 - $18 Control 1 registr

D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0	**Bit**
DFBW	**THOPT**	**ZDA**	**YDA**	**XDA**	**INTREF[1]**	**INTREG[0]**	**INTPIN**	**Funkce**
0	0	0	0	0	0	0	0	**Normálně**

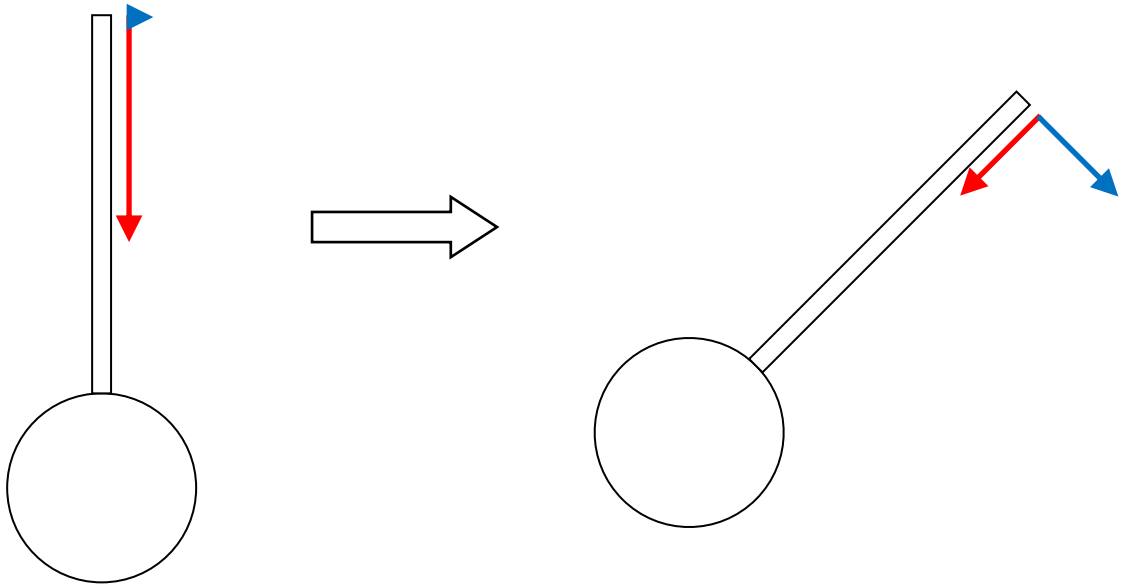
Při komunikaci nejdříve pošleme na akcelerometr adresu registru, ze kterého chceme číst nebo do něj zapisovat. Adresa se skládá z write/read bitu na sedmém bitu, tento byt říká jestli budeme číst, bit je v nule, nebo zapisovat, bit se nastaví do jedničky. Dalších 6 bitů se používá pro adresu, poslední bit je nepoužívaný.

Ukázka kódu úpravy adresy pro zápis:

```
adresa = (adresa<<1); // posun adresy o jeden bit
adresa |= (1 << 7);   // nastavení bitu pro zapis
SPI_MasterTransmit(adresa); // nastaví adresu
SPI_MasterTransmit(data);  // pošle data
```

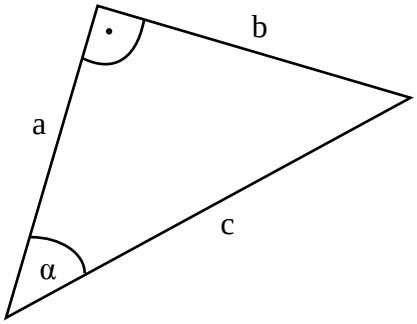
4.5.4 Výpočet úhlu a PID regulátor

Pro zjištění úhlu náklonu se použijí data z dvou os akcelerometru. Když bude robot stát kolmo k zemi, jeho zrychlení osy rovnoběžné s tělem robota bude měřit plné gravitační zrychlení. Osa kolmá k tělu robota nebude měřit žádné zrychlení. Když se tento robot začne naklánět, bude se zrychlení ose rovnoběžné zmenšovat a zrychlení v ose kolmé zvětšovat, při úhlu 45° budou zrychlení sobě rovné (Obrázek 32).



Obrázek 32 - působení gravitační síly na akcelerometr

Známe tedy velikost dvou odvěsen pravoúhlého trojúhelníku a potřebujeme vypočítat úhel, který svírá rovnoběžná osa s přeponou (Obrázek 33). K tomuto výpočtu použijeme funkci tangens (4.1).



Obrázek 33 - pravoúhlý trojúhelník s vyznačeným úhlem α

$$\tan \alpha = \frac{b}{a} \tag{4.1}$$

$$\alpha = \tan^{-1}(\frac{b}{a})$$

K vypočtení úhlu v jazyce C, pomocí funkce tangens, musíme nejdříve do projektu vložit knihovnu math.h. Poté vypočítáme úhel pomocí funkce atan2(), která má dvě vstupní hodnoty a vrací vypočtený úhel.

Úhel náklonu potom vložíme do PID regulátoru, který bude vypočítávat potřebnou rychlost pro stabilizaci polohy.

```
P = Kp * chyba; // výpočet proporcionální složky
integracni_chyba = integracni_chyba + chyba;
I = Ki * integracni_chyba; // výpočet integrační sloky
posledni_chyba = posledni_uhel - zadany_uhel;
D = Kd * (posledni_chyba - chyba); // výpočet derivační složky
PID = P + I + D; // celkový PID regulátor
if (PID < -255) PID = -255; // omezení PID regulátoru ze spoda
else if (PID > 255) PID = 255; // omezení PID regulátoru ze zhora
```

Kp, Ki a Kd jsou konstanty, které budou nastavovány podle potřeby pro udržení stabilní polohy. Výstup PID je ze zdola a shora omezen na hodnotu 255 což je maximální 8-bitové číslo. Znaménko před číslem bude udávat směr chodu motorů, poté PID hodnota bude uložena do registru čítače/časovače. Kvůli záporné hodnotě z výstupu PID regulátoru se pro uložení do registrů čítače/časovače použije absolutní hodnota.

```
PWM_hodnota = PID_reg(uhel, 0, posledni_uhel); // vypocteni
if (PWM_hodnota >= 0) kam1 = 1; // zjištění směru vpřed
else if (PWM_hodnota < 0) kam1 = 0; // zjištění směru vzad
if (uhel < 10 && uhel > -10) PWM_hodnota = 0; // nastavení vypnutí
motorů, mrtví úhel
PWM_hodnota = abs(PWM_hodnota); // odstranění znaménka hodnoty
Motor_jet(PWM_hodnota, kam1); // funkce pro pohyb motoru, predava
hodnotu pro PWM a směr
```

Závěr

Práci na sestavení balancujícího robota jsem rozdělil na dvě části. Na teoretickou, ve které je vysvětlena problematika balancujícího robota, zjištění polohy v prostoru a elektrických motorů. Druhá část se pak zabývá praktickou stránkou, vytvoření desky a programování.

Balancující robot byl popsán jako, inverzní kyvadlo s dvěma stupni volnosti, v této kapitole byl ukázán fyzikální model balancujícího robota, který byl popsán matematickými rovnicemi.

V další kapitole jsem se zabýval senzory, které by mohli být použity pro zjištění polohy robota. Z uvedených senzorů byl vybrán kapacitní akcelerometr a to díky svým vlastnostem, hlavně možnosti měřit gravitační zrychlení.

Při výběru pohonu jsem měl požadavky na snadnou řiditelnost motoru, velikost motoru a cenovou dostupnost. Podle těchto kritérii byl vybrán stejnosměrný motor, který se jednoduše řídí pomocí pulsně šířkové modulace a je velmi jednoduchý na výrobu, tedy i levný.

Pro praktické sestavení byl vybrán mikrokontrolér Atmega88, který pomocí SPI sběrnice, komunikuje s akcelerometrem MMA7455L. Z akcelerometru dostáváme data o zrychlení z dvou os, a díky tomu můžeme určit úhel náklonu. Úhel náklon se pak v mikroprocesoru zpracovává pomocí jednoduchého PID regulátoru, z něhož získáváme data pro registry čítače/časovače. Čítač/časovač pak posílá z výstupu mikrokontroléru PWM signál pomocí kterého jsou motory ovládány.

Při návrhu desky došlo k chybě, bylo uvažováno dvojí logické napětí, pět voltů pro ATmegu88 a 3,3V pro MMA7455L. Bohužel MMA7455L by nezvládl pěti voltovou logiku, proto byl na desce pěti voltový stabilizátor nahrazen stabilizátorem na 3,3V a druhý stabilizátor, k akcelerometru, vynechán a přemostěn.

Literatura

[1] ZETKA, PETR. *REALIZACE JEDNODUCHÉHO DYNAMICKÉHO MODELU POMOCÍ ODE*. BRNO, 2009. Dostupné z: http://autnt.fme.vutbr.cz/szz/2009/BP_Zetka.pdf. BAKALÁŘSKÁ PRÁCE. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce ING. STANISLAV VĚCHET, PH.D.

[2] FAMFULÍK, Lukáš. *DIGITÁLNÍ KYVADLOVÝ INKLINOMETR*. 2008, BRNO. Dostupné z: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=9490. Bakalářská práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Ing.Viera Biolková.

[3] VOJÁČEK, Antonín. Integrované MEMS GYROSKOPY. In: *HW.cz: Automatizace* [online]. 2009 [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: http://automatizace.hw.cz/integrovane-mems-gyroskopy

[4] VOJÁČEK, Antonín. Jak pracují nové 3D MEMS akcelerometry Freescale ?. In: *HW.cz: Součásky* [online]. 2007 [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: http://www.hw.cz/soucastky/jak-pracuji-nove-3d-mems-akcelerometry-freescale.html

[5] VOJÁČEK, Antonín. Principy akcelerometrů - 1. díl - Piezoelektrické. In: *HW.cz: Automatizace* [online]. 2007 [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: http://automatizace.hw.cz/clanek/2007011401

[6] VOJÁČEK, Antonín. Principy akcelerometrů - 2. díl - Piezorezistivní. In: *HW.cz: Automatizace* [online]. 2007 [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: http://automatizace.hw.cz/clanek/2007012601

[7] Inerciální a neinerciální soustavy. *FyzWeb* [online]. [cit. 2013-05-22]. Dostupné z: http://fyzweb.cuni.cz/dilna/krouzky/sr_rot/k28.htm

[8] Coriolisova síla. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2013, 9.4.2013 [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Coriolisova_síla

[9] Lorentzova síla. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2013, 9. 3. 2013 [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Lorentzova_síla

[10] HUSÁK, Miroslav. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE. *Akcelerometry*. 2009. Dostupné z: http://www.micro.feld.cvut.cz/home/X34SES/prednasky/08%20Akcelerometry.pdf

[11] RADA, Václav. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. *Stejnosměrné motory*. 2006. Dostupné z: http://www.fce.vutbr.cz/tst/rada.v/ELTECH/EL-MOTT-SS.DOC

[12] ŠIMON, Josef. BLDC aneb DC motor s nulovými náklady na údržbu. *Elektro*. 2011, č. 10. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/44507.pdf

[13] *ASYNCHRONNÍ (INDUKČNÍ) STROJE (MOTORY)*. 2006. Dostupné z: http://www.pslib.cz/pe/skola/studijni_materialy/motory/indukcni_motor/asynchr_motor_teorie.pdf

[14] ŘEZÁČ, Martin. Krokové motory: princip funkce, metody řízení. In: *Robotika.cz* [online]. 2002 [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: http://robotika.cz/articles/steppers/

[15] DLOUHÝ, Martin a Zbyněk WINKLER. Enkodéry. In: *Robotika.cz* [online]. 2003 [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: http://robotika.cz/guide/encoders/cs

[16] ATMEL. *ATmega48/88/168: datasheet* [online]. 2011 [cit. 2013-5-17]. Dostupné z: http://www.atmel.com/Images/doc2545.pdf

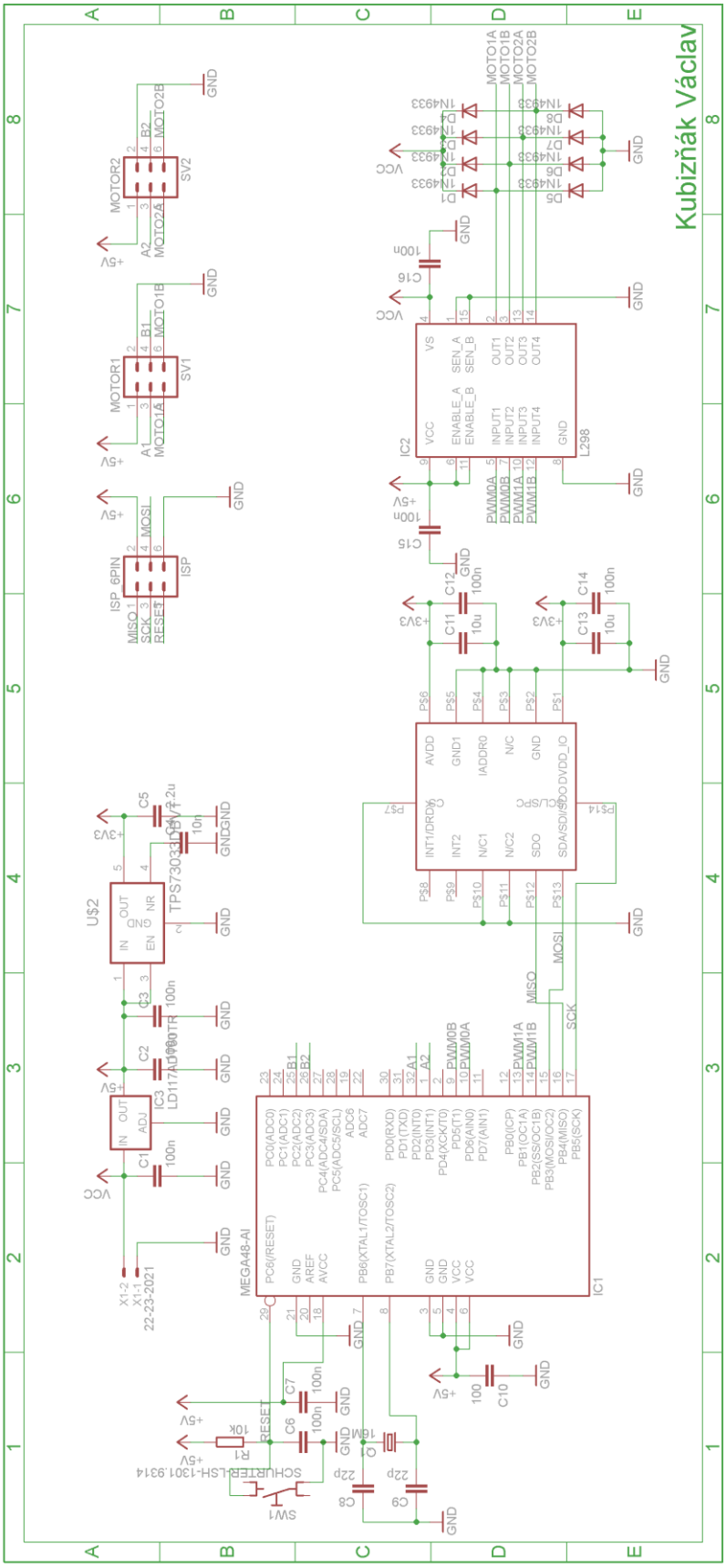
[17] FREESCALE SEMICONDUCTOR. *MMA7455L: datasheet* [online]. 2009 [cit. 2013-5-17]. Dostupné z: http://www.freescale.com/files/sensors/doc/data_sheet/MMA7455L.pdf

[18] STMICROELECTRONICS. *L298: datasheet* [online]. 2000 [cit. 2013-5-17]. Dostupné z: https://www.sparkfun.com/datasheets/Robotics/L298_H_Bridge.pdf

Příloha A – Seznam součástek

Součástka:	Hodnota:	Pouzdro:
C1	100n	C0603
C2	100n	C0603
C3	100n	C0603
C4	10n	C0603
C5	2.2u	C0603
C6	100n	C0603
C7	100n	C0603
C8	22p	C0603
C9	22p	C0603
C10	100	C0603
C11	10u	C0603
C12	100n	C0603
C13	10u	C0603
C14	100n	C0603
C15	100n	C0603
C16	100n	C0603
D1	1N4933	DO41-10
D2	1N4933	DO41-10
D3	1N4933	DO41-10
D4	1N4933	DO41-10
D5	1N4933	DO41-10
D6	1N4933	DO41-10
D7	1N4933	DO41-10
D8	1N4933	DO41-10
IC1	MEGA88-AI	TQFP32-08
IC2	L298	MULTIWATT-15
IC3	LD1117DT50TR (Nahrazen stabilizátorem na 3,3V)	DPACK
ISP	ISP_6PIN	ML6
Q1	16M	HC49UP
R1	10k	R0603
SV1	MOTOR1	ML6
SV2	MOTOR2	ML6
SW1	SCHURTER-LSH-1301.9314	LSH
U$1	MMA7455L	
U$2	TPS73033DBVT (Vynechán a přemostěn)	SOT95
X1	22-23-2021	22-23-2021

Příloha B – Schéma obvodu



Příloha C – Obsah přiloženého CD

Obsah přiloženého CD:

- KubiznakV_jednonapravovybalancujicirobot_PR_2013.pdf – text práce
- Adresář DPS – schéma, návrh desky v programu Eagle
- Adresář software – program v jazyce C a jeho převod pro mikroprocesor