

UNIVERZITA PARDUBICE  
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Balancující robot  
Radek Dymák

Bakalářská práce  
2013

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Radek Dymák**  
Osobní číslo: **I10276**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komunikační a mikroprocesorová technika**  
Název tématu: **Balancující robot**  
Zadávací katedra: **Katedra elektrotechniky**

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

Úkolem je vytvoření balancujícího robota schopného udržet rovnováhu na jedné nápravě chovající se jako inverzní kyvadlo, viz video. <http://www.youtube.com/watch-v=IH4EZ1GCrK0>  
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://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](http://www.robotika.cz)

Vedoucí bakalářské práce:

**Ing. Pavel Rozsival**  
Katedra elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **21. prosince 2012**

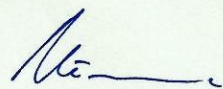
Termín odevzdání bakalářské práce: **10. května 2013**



prof. Ing. Simeon Karamazov, Dr.  
děkan



L.S.



Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 29. března 2013


## **Prohlášení autora**

Prohlašuji, že jsem tuto práci 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 8.5.2013



Radek Dymák

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce, Ing. Pavlu Rozsivalovi, za poskytnuté odborné konzultace a ochotu a všem ostatním, především pak rodinným příslušníkům a přítelkyni za podporu.

## **Anotace**

Práce se zabývá návrhem robota balancujícího na jedné nápravě s využitím akcelerometru a gyroskopu. Robot je řízen mikrokontrolérem, který na základě naměřených dat ze senzoru nastaví rychlost a směr otáčení stejnosměrných motorů, které celého robota udržují ve vzpřímené poloze.

## **Klíčová slova**

akcelerometr, gyroskop, mikrokontrolér, stejnosměrný motor

## **Title**

Balancing robot

## **Annotation**

The thesis proposes of the balancing robot on one axle using the accelerometer and gyroscope. The robot is controlled by a microcontroller, which on the basis of measured data from the sensor sets the speed and direction of a rotation of DC motors that keeps the robot upright

## **Keywords**

accelerometer, gyroscope, microcontroller, DC motor

## Obsah

<b>Seznam zkratk</b> .....	<b>8</b>
<b>Seznam obrázků</b> .....	<b>9</b>
<b>Seznam tabulek</b> .....	<b>9</b>
<b>Úvod</b> .....	<b>10</b>
<b>1 Měření úhlu náklonu</b> .....	<b>11</b>
1.1 Definice rovinného úhlu .....	11
1.2 Měření pomocí inklinometru .....	12
1.2.1 Mechanický inklinometr .....	12
1.2.2 Konduktometrický inklinometr .....	12
1.2.3 Kapacitní inklinometr .....	13
1.3 Měření pomocí akcelerometru .....	15
1.3.1 Zrychlení .....	15
1.3.2 Princip výpočtu úhlu náklonu .....	16
1.3.3 Piezoelektrický akcelerometr .....	17
1.3.4 Piezorezistivní akcelerometr .....	18
1.3.5 Kapacitní akcelerometr .....	19
1.3.6 Teplotní akcelerometr .....	21
1.4 Měření pomocí gyroskopu .....	22
1.4.1 Úhlová rychlost a princip výpočtu úhlu náklonu .....	22
1.4.2 Rotační gyroskop .....	23
1.4.3 Vibrační gyroskop .....	24
1.4.4 Optický gyroskop .....	25
<b>2 Typy pohonu kol elektromotory</b> .....	<b>26</b>
2.1 Stejnsměrné motory s komutátorem.....	26
2.1.1 Řízení stejnosměrného komutátorového motoru.....	27
2.2 Stejnsměrné motory bez komutátoru.....	28
2.3 Krokové motory .....	28
2.4 Servomotory.....	29
<b>3 Metody regulace výstupní veličiny</b> .....	<b>30</b>
3.1 Regulace bez zpětné vazby .....	30
3.2 Regulace se zpětnou vazbou .....	30

3.2.1	Proporcionální regulátor .....	31
3.2.2	Proporcionálně-Integrační regulátor .....	31
3.2.3	Proporcionálně-Integračně-Derivační regulátor.....	32
3.2.4	Nastavení konstant zesílení složek regulátoru .....	33
<b>4</b>	<b>Praktická realizace robota .....</b>	<b>34</b>
4.1	Mikrokontrolér .....	35
4.1.1	Parametry ATmega 48/88/168/328 .....	35
4.1.2	PWM výstup čítače/časovače.....	36
4.1.3	SPI komunikace.....	37
4.2	Akcelerometr a gyroskop.....	38
4.2.1	Parametry LSM330DLC .....	38
4.2.2	SPI komunikace.....	39
4.3	H-můstek.....	40
4.3.1	Parametry L6201 .....	40
4.4	Motory a kola .....	40
4.5	Řídící program mikrokontroléru .....	42
4.5.1	Hlavní smyčka programu .....	43
4.5.2	Funkce NastavMotory.....	43
	<b>Závěr .....</b>	<b>45</b>
	<b>Literatura.....</b>	<b>47</b>
	<b>Příloha A – Obsah CD .....</b>	<b>49</b>
	<b>Příloha B – Schéma řídicí části.....</b>	<b>50</b>
	<b>Příloha C – Schéma obvodu H-můstku.....</b>	<b>51</b>
	<b>Příloha D – Fotografie řídicí části a obvodu H-můstku s motorem .....</b>	<b>52</b>
	<b>Příloha E – Fotografie robota v činnosti.....</b>	<b>53</b>



## Seznam zkratk

MEMS	Micro Electro Mechanical Systems (mikro elektromechanické systémy)
HGA	Heated-Gas Accelerometer (akcelerometr na bázi vyhřívání plynu)
GPS	Global Positioning System (globální družicový polohový systém)
DC	Direct Current (stejnoseměrný proud)
PWM	Pulse Width Modulation (pulzně šířková modulace)
BLDC	Brushless Direct Current motor (bezkartáčový stejnosměrný motor)
CNC	Computer Numerical Control (počítačově numerické řízení)
PID regulátor	Proportional-Integral-Derivative regulator (proporcionálně-integrálně-derivační regulátor)
SPI	Serial Peripheral Interface (sériové periferní rozhraní)
ISP	In-System Programming (systém programování čipu instalovaného v zařízení)
RISC	Reduced Instruction Set Computing (redukovaná instrukční sada)
I2C	Inter-Integrated Circuit (multimasterová sériová sběrnice)
MSB	Most Significant Bit (nejvýznamnější bit)
LSB	Least Significant Bit (nejméně významný bit)
MISO	Master In Slave Out (master vstup, slave výstup kanál)
MOSI	Master Out Slave In (master výstup, slave vstup kanál)
SS	Slave Select (pin výběru slave zařízení)
CS	Chip Select (pin pro výběr aktivního zařízení)
DMOS	Double-diffused Metal–Oxide–Semiconductor (dvojitě difundovaná struktura kov-oxid-polovodič)

## Seznam obrázků

Obrázek 1 – Konvexní rovinný úhel.....	11
Obrázek 2 – Radián.....	11
Obrázek 3 – Mechanický inklinometr.....	12
Obrázek 4 – Konduktometrický inklinometr.....	13
Obrázek 5 – Kapacitní inklinometr.....	14
Obrázek 6 – Princip výpočtu úhlu náklonu.....	16
Obrázek 7 – Piezoelektrický akcelerometr.....	17
Obrázek 8 – Wheatstoneův můstek.....	18
Obrázek 9 – Piezorezistivní akcelerometr.....	19
Obrázek 10 – Princip kapacitního akcelerometru.....	20
Obrázek 11 – MEMS kapacitní akcelerometr (THE OPEN UNIVERSITY, 2013).....	21
Obrázek 12 – Teplotní HGA akcelerometr.....	21
Obrázek 13 – Vektor úhlové rychlosti.....	22
Obrázek 14 – Rotační gyroskop.....	23
Obrázek 15 – Vibrační gyroskop.....	25
Obrázek 16 – Optický gyroskop.....	25
Obrázek 17 – Stejnoseměrný komutátorový motor (Wikimedia Foundation, 2007).....	26
Obrázek 18 – Princip H-můstku.....	27
Obrázek 19 – Princip krokového motoru.....	29
Obrázek 20 – Regulace bez zpětné vazby.....	30
Obrázek 21 – Regulátor se zpětnou vazbou.....	30
Obrázek 22 – Výstupní veličina P regulátoru (MRK s.r.o., -2013).....	31
Obrázek 23 – Výstupní veličina PI regulátoru (MRK s.r.o., -2013).....	32
Obrázek 24 – Výstupní veličina PID regulátoru (MRK s.r.o., -2013).....	33
Obrázek 25 – Blokové schéma robota.....	34
Obrázek 26 – Blokové schéma čítače/časovače (ATMEL CORPORATION, 2011).....	36
Obrázek 27 – Blokové schéma SPI části (ATMEL CORPORATION, 2011).....	37
Obrázek 28 – Průběh SPI komunikace (STMICROELECTRONICS, 2012).....	39
Obrázek 29 – Motor Pololu 1585 (POLOLU CORPORATION, 2001-2013).....	41
Obrázek 30 – Kola Pololu 1420 (POLOLU CORPORATION, 2001-2013).....	41
Obrázek 31 – Vývojový diagram.....	42

## Seznam tabulek

Tabulka 1 – Rozdělení akcelerometrů dle principu funkčnosti.....	15
Tabulka 2 – Rozdělení gyroskopů dle principu funkčnosti.....	22
Tabulka 3 – Konstanty zesílení složek regulátorů (Wikimedia Foundation, 2013).....	33
Tabulka 4 – Nastavení rozsahu senzoru (STMICROELECTRONICS, 2012).....	38

## Úvod

Cílem této práce je provést rozbor možností určení proměnného úhlu náklonu objektu od svislé polohy s využitím dostupných prostředků a způsoby jeho minimalizace a regulace s pomocí elektromotorových pohonů a možnosti jejich řízení a buzení běžně vyráběnými integrovanými obvody, za účelem volby vhodného snadno implementovatelného řešení pro výrobu prototypu balancujícího robota na jedné nápravě zkonstruovaného v domácích podmínkách.

Bakalářská práce je rozdělena do dvou logických celků. První část je spíše teoretickou částí, ve které jsou popisovány především varianty měření náklonu roviny, druhy, popis činnosti akcelerometrů, dělení a informace o gyroskopech a rozbor a řízení elektromotorů.

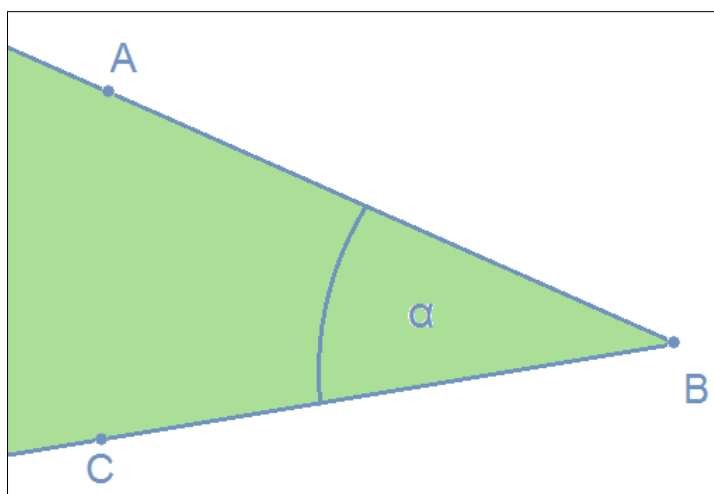
V druhé části této práce je popisována praktická část. Jsou zde zveřejněny konkrétní použité komponenty, jako je například stěžejní komponenta robota mikrokontrolér AVR řady ATmega 48/88/168/328 společnosti Atmel, a jejich vlastnosti. Vysvětlení příčin volby daných prvků. Způsob a princip komunikace a získávání dat z integrovaného obvodu akcelerometru a gyroskopu LSM330DLC výrobce STMicroelectronics. Výběr stejnosměrných motorů a popis algoritmu pro výpočet a řízení rychlosti a směru jejich otáčení. V této části je také zahrnut a objasněn výběr komponent v závislosti na vzájemné kompatibilitě a řešení napájení všech součástí. Kromě toho se zde nacházejí další části popisující konkrétní řešení jednotlivých dílčích funkčních celků a ostatních věcí souvisejících s návrhem, či praktickou realizací celého zařízení.

Posledním bodem této práce je pak závěr se shrnutím a hodnocením průběhu a výsledku celé práce.

# 1 Měření úhlu náklonu

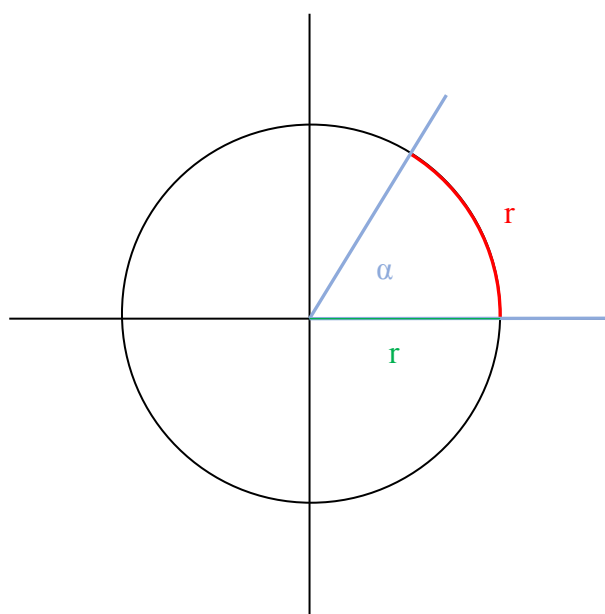
## 1.1 Definice rovinného úhlu

Úhel je část roviny ohraničená dvěma polopřímkami, které mají společný počátek. Na této definici je důležité, že úhel nejsou pouze ty dvě polopřímky, nýbrž celá rovina, kterou tyto dvě ramena svírají (HAVRLANT, 2006-2013). Na obrázku: Obrázek 1 je úhel  $\alpha$ , který je vymezen polopřímkami BA a BC a tvoří tak úhel CBA.



Obrázek 1 – Konvexní rovinný úhel

SI jednotkou rovinného úhlu je Radián [rad]. Jedná se o jednotku odvozenou definovanou jako velikost středového úhlu oblouku, jehož délka je rovna danému poloměru oblouku (HAVRLANT, 2006-2013). Znázornění definice je na obrázku: Obrázek 2



Obrázek 2 – Radián

Alternativou k jednotce Radián je úhlový stupeň [°], který je využíván především pro svou celočíselnou interpretaci plného úhlu. Pro vzájemný přepočítání lze využít vztahu dle rovnice (1.1)

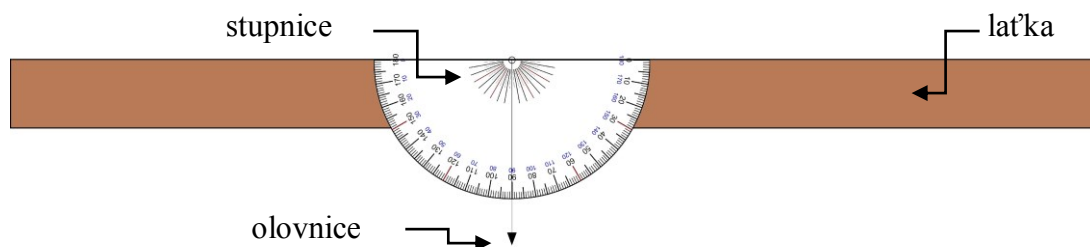
$$1^\circ = \frac{\pi}{180} \text{ rad} \quad (1.1)$$

## 1.2 Měření pomocí inklinometru

Inklinometry pracují na principu vytvoření referenčního úhlu a měření odchylky od něj. Nejčastěji je reference vytvořena pomocí olovnice u mechanického inklinometru a pomocí vodorovné hladiny kapalin u inklinometrů elektronických.

### 1.2.1 Mechanický inklinometr

Mechanický inklinometr se skládá ze dvou částí. Referenčním prvkem je olovnice nebo jiné závaží zavěšené na laťce. Bod upevnění olovnice je zároveň osou otáčení inklinometru. Na lať je připevněna půlkruhová úhlová stupnice (úhloměr) a to tak aby jeho střed byl opět v ose otáčení a stupnice byla orientovaná takovým směrem, aby závěsné lanko olovnice bylo ručkou měřicího přístroje. Takovýto inklinometr je sice konstrukčně snadný, levný a může být i přesný, ovšem není vhodný k použití v zařízeních, jelikož hodnota úhlu musí být odečtena obsluhou a nelze její odečet snadno automatizovat. Příklad takového inklinometru s rozsahem  $\pm 90^\circ$  je uveden na obrázku: Obrázek 3.

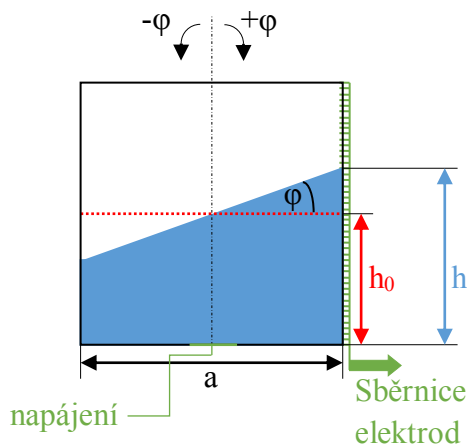


Obrázek 3 – Mechanický inklinometr

### 1.2.2 Konduktometrický inklinometr

Princip tohoto druhu inklinometrů je založen na konduktometrickém měření hladiny s tím rozdílem, že objem vodivé kapaliny v nádobě je konstantní (její hodnota je vyjádřena rovnicí (1.2)) a jednotlivé elektrody jsou spínány pouze v závislosti na náklonu senzoru. Každá z řady elektrod se nachází v jednom ze dvou logických stavů, které reprezentují, zda se kapalina dotýká elektrody či nikoli. Nevýhodou takového mechanismu je nutnost velkého počtu elektrod k dosažení vysoké přesnosti. Pro takovýto senzor je nutné zamezit chemickým reakcím na elektrodách. Z tohoto důvodu je nutno použít vhodné kapaliny a materiálu elektrod. Z důvodu nemalého kapacitního charakteru impedance kapalin se využívá střídavého napětí o nízkém napětí. Výhodou tohoto senzoru je jeho nezávislost na velikosti gravitačního zrychlení. Nákres tohoto inklinometru

s rozsahem  $\pm 45^\circ$  je na obrázku: Obrázek 4 a následuje vzorec (1.3) úhlu náklonu pro případ inklinometru se čtvercovým průřezem. (DIGI-KEY, 1995-2013)



Obrázek 4 – Konduktometrický inklinometr

$$V = h_0 \cdot a \cdot b \quad [m^3] \quad (1.2)$$

$$\varphi = \arctg \frac{h - h_0}{\frac{a}{2}} \quad [rad] \quad (1.3)$$

kde  $V$  – je konstantní objem kapaliny

$h_0$  – je klidová výška hladiny při nulovém náklonu

$a$  – je rozměr hrany čtvercové stěny kvádrů senzoru

$b$  – je rozměr hloubky kvádrů senzoru

$h$  – je aktuální výška hladiny na straně elektrod

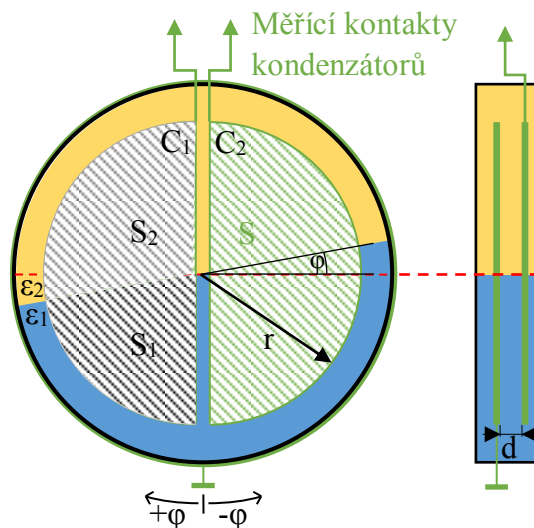
$\varphi$  – je výsledný úhel natočení inklinometru

### 1.2.3 Kapacitní inklinometr

Kapacitní inklinometry mají z principu kruhový průřez. Jedna z těchto kruhových stěn je společnou elektrodou pro oba kondenzátory, které senzor tvoří. Druhé elektrody kondenzátorů jsou tvořeny na protilehlé straně dvojicí půlkruhových vodivých ploch. Mezi deskami obou kondenzátorů je speciální dielektrická kapalina, která při klidovém nulovém stavu zasahuje do obou kondenzátorů stejně a zaplní polovinu celkového objemu senzoru. Zbývající prostor je vyplněn vzduchem, či jinou dielektrickou látkou s odlišnou permitivitou a především nesmí dojít k promísení obou látek. V takovémto stavu mají oba kondenzátory stejnou kapacitu. Při natočení senzoru dojde k převaze jedné dielektrické látky v jednom kondenzátoru a druhé látky v druhém a jejich kapacity již budou odlišné. Na tomto základě lze následně vyjádřit ze znalosti rozdílu hodnot obou kapacit vztah

pro úhel náklonu viz rovnice (1.9). Jedná se tedy o diferenční měření. Příklad takového senzoru je na obrázku: Obrázek 5.

Speciální složení dielektrické kapaliny zaručuje optimální teplotní chování, vysokou dlouhodobou stabilitu, minimální chyby linearity, krátké odezvy a mnoho dalších pozitivních vlastností snímačů. (SEIDEL, 2013)



Obrázek 5 – Kapacitní inklinometr

$$S = \frac{\pi \cdot r^2}{2} [m^2] \quad (1.4)$$

$$S_1 = \frac{S}{180} \cdot (90 - \varphi), S_2 = \frac{S}{180} \cdot (90 + \varphi) \quad (1.5)$$

$$C_1 = \varepsilon_1 \cdot \frac{S_1}{d} + \varepsilon_2 \cdot \frac{S_2}{d}, C_2 = \varepsilon_1 \cdot \frac{S_2}{d} + \varepsilon_2 \cdot \frac{S_1}{d} \quad (1.6)$$

$$C_1 - C_2 = \frac{\varepsilon_1}{d} \cdot (S_1 - S_2) + \frac{\varepsilon_2}{d} \cdot (S_2 - S_1) = (S_1 - S_2) \cdot \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{d} \quad (1.7)$$

$$C_1 - C_2 = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{d} \cdot \left( \frac{S}{180} \cdot (90 - \varphi) - \frac{S}{180} \cdot (90 + \varphi) \right) = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{d} \cdot \frac{\varphi \cdot S}{90} \quad (1.8)$$

$$\varphi = \frac{90 \cdot d \cdot (C_1 - C_2)}{S \cdot (\varepsilon_2 - \varepsilon_1)} [^\circ] \quad (1.9)$$

kde: S – je plocha jedné desky kondenzátoru

r – je poloměr desek kondenzátoru

$S_1, S_2$  – jsou části plochy desky kondenzátoru rozdělené rozhraním dvou dielektrik

$\varphi$  – je úhel natočení senzoru

$C_1, C_2$  – jsou kapacity kondenzátorů snímače

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$  – jsou permitivity jednotlivých dielektrik

$d$  – je vzdálenost mezi deskami kondenzátorů (hloubka senzoru)

### 1.3 Měření pomocí akcelerometru

Akcelerometr je zařízení, jehož hlavním úkolem je měřit akceleraci (zrychlení). Využití ale nalezneme i v měření otřesů, vibrací či nárazů. Rozvojem techniky a minimalizací rozměru součástek a i především snížením ceny jsou akcelerometry využívány stále více například i v telefonních přístrojích či herním průmyslu. Akcelerometry mohou měřit zrychlení v jedné ose, ve dvou osách nebo ve třech osách dle toho jsou označovány také jako 1D, 2D nebo 3D akcelerometry. Akcelerometry měří dynamické (v čase proměnné) nebo statické zrychlení. Právě přítomnosti statického gravitačního zrychlení je využito pro měření náklonu. Přehled základního členění akcelerometrů je v tabulce: Tabulka 1.

Tabulka 1 – Rozdělení akcelerometrů dle principu funkčnosti

Princip převodu na elektrickou veličinu	Druh akcelerometru
mechanické namáhání	Piezelektrické akcelerometry Piezorezistivní akcelerometry
změna polohy (posunutí)	Kapacitní akcelerometry Indukční akcelerometry Potenciometrické akcelerometry
přenos tepla	Tepelné akcelerometry

#### 1.3.1 Zrychlení

Zrychlení je charakteristická vlastnost pohybu, která vypovídá o změnách průběhu rychlosti pohybu v čase. Jedná se o vektorovou veličinu a tudíž je určena velikostí a směrem, kterým působí na hmotný bod.

Rozlišujeme dva druhy zrychlení. Prvním je průměrné zrychlení, které je vyjádřeno rovnicí (1.10). Jedná se o změnu rychlosti za jistou dobu. Druhý případ je limitním případem, kdy uplynulý čas se blíží k nule. Jedná se o okamžitou hodnotu zrychlení a je vyjádřena vztahem (1.11).



$$\bar{a} = \frac{\Delta v}{\Delta t} [m \cdot s^{-2}] \quad (1.10)$$

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2 s}{dt^2} [m \cdot s^{-2}] \quad (1.11)$$

kde:  $\bar{a}$  – je průměrná hodnota zrychlení

$\Delta v$ ,  $\Delta t$  – jsou změna rychlosti a změna času

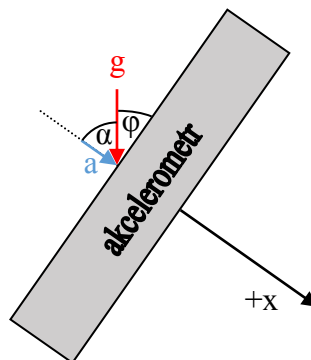
$a$  – je okamžitá hodnota zrychlení

$s$  – je dráha

Stěžejním zrychlením je gravitační zrychlení. Jeho hodnota je nepatrně závislá na nadmořské výšce a zeměpisných souřadnicích. To je dáno tím, že planeta Země není kulová ale na pólech zploštělá, tudíž se póly nacházejí blíže zemskému středu a je zde vyšší intenzita magnetického pole. Proto bylo stanoveno normální gravitační zrychlení  $g_0 = 9,80665 \text{ ms}^{-2}$ , což odpovídá zrychlení na  $45^\circ$  zeměpisné šířky v úrovni hladiny moře. (ZEMĚPIS.COM, 2002-2011)

### 1.3.2 Princip výpočtu úhlu náklonu

Za předpokladu pomalu se měnícího úhlu náklonu je vhodné využít k jeho výpočtu konstantní hodnoty gravitačního zrychlení  $g$ , které působí vždy kolmo k povrchu Země. Odkloní-li se akcelerometr o úhel  $\varphi$ , bude pak na akcelerometr působit zrychlení, které je přímo úměrné kosinu doplňkového úhlu  $\alpha$  dle vztahu (1.12). Podstatné je, aby otáčení akcelerometru bylo natolik šetrné, aby nepůsobili na měřící stěnu akcelerometru srovnatelná zrychlení se zrychlením  $a$ , které je průmětem gravitačního zrychlení do měřící osy. Nákres takového způsobu měření je na obrázku: Obrázek 6. Výsledný úhel je vyjádřen rovnicí (1.13).



Obrázek 6 – Princip výpočtu úhlu náklonu

$$a = g \cdot \cos(\alpha) = g \cdot \cos(90 - \varphi) \quad (1.12)$$

$$\varphi = 90 - \arccos\left(\frac{a}{g}\right) \quad (1.13)$$

kde:  $a$  – je zrychlení působící na měřící osu akcelerometru

$g$  – je gravitační zrychlení

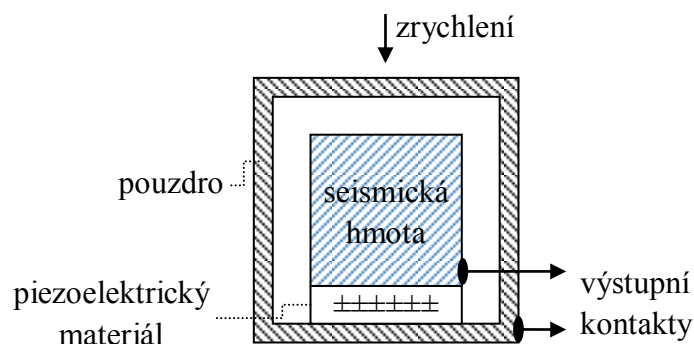
$\alpha$  – doplňkový úhel k úhlu náklonu  $\varphi$

$\varphi$  – je požadovaný úhel náklonu

### 1.3.3 Piezoelektrický akcelerometr

Piezoelektrický akcelerometr využívá ke své funkci piezoelektrických materiálů, které při jejich mechanickém namáhání produkují náboj, úměrný velikosti síly působící na piezoelektrický krystal. Jako piezoelektrického materiálu se nejběžněji využívá titaničitan barnatý a tuhé roztoky oxidu olova, zirkonu a titanu. Senzor má integrované elektronické prvky, které zajistí převod náboje na napětí, případně zesílí toto napětí a usnadní tak používání senzoru. Tento druh senzoru je vhodný pro frekvenční rozsah zrychlení od 2 Hz do 5 kHz, nejsou tak vhodné pro měření konstantního zrychlení. Jejich výhodou je vysoká linearita převodní charakteristiky a široký rozsah pracovních teplot (až do 120 °C). (FRADEN, 2004)

Akcelerometr je sestaven ze tří částí (seismická hmota, piezoelektrický materiál, pouzdro senzoru). K pouzdru součástky, na které působí měřené zrychlení, je připevněn piezoelektrický materiál. Jeho druhá strana je spojena se seismickou hmotou o známé hmotnosti. Při zrychlení pouzdra bude na seismickou hmotu přes piezoelektrický materiál vyvíjena síla dle rovnice (1.14), která vyvolá změnu náboje piezoelektrického materiálu. Principiální schéma jednoosého senzoru je na obrázku: Obrázek 7.



Obrázek 7 – Piezoelektrický akcelerometr

$$F = m \cdot a \text{ [N]} \quad (1.14)$$

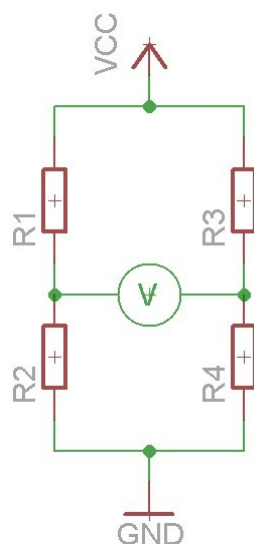
kde:  $F$  – je síla působící na seismickou hmotu

$m$  – je hmotnost seismické hmoty

$a$  – je neznámá měřená hodnota zrychlení

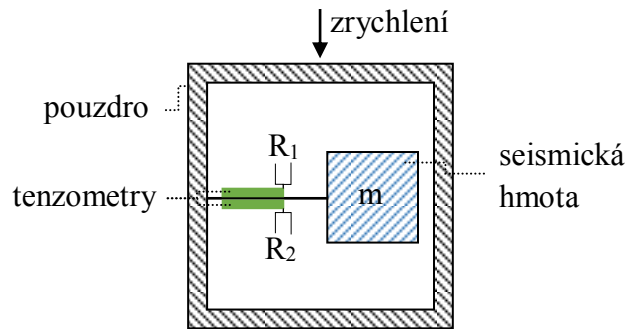
### 1.3.4 Piezorezistivní akcelerometr

Základem piezorezistivního (tenzometrického) akcelerometru je piezorezistivní materiál, který vlivem namáhání (deformace) mění svůj elektrický odpor. Jedná se především o ohyb látky dle Hookova zákona (vratná destrukce trvajících po dobu působení vnější síly a úměrná této síle). Na rozdíl od piezoelektrického akcelerometru je piezorezistivní akcelerometr schopen měřit konstantní zrychlení a jeho pracovní frekvenční rozsah je od 0 do 13 kHz. Jejich nevýhodou je silná teplotní závislost, tu je možné kompenzovat použitím dvou tenzometrů v kombinaci s můstkovým zapojením (zapojení dle obrázku: Obrázek 8), čímž se zároveň zvýší citlivost. (FRADEN, 2004)



Obrázek 8 – Wheatstoneův můstek

Tenzometrický akcelerometr využívá hmotnosti seismické hmoty, která působí na nosník silou. V důsledku toho dochází k ohybu nosníku. Tudíž se změní i délka tenzometrů a dle vztahu (1.15) dojde i ke změně jejich elektrického odporu. Na schématu dle obrázku: Obrázek 9 je jednoosý tenzometrický akcelerometr, jehož tenzometry jsou umístěny proti sobě tak aby u nich střídavě docházelo k prodloužení a zkrácení jejich délky.



Obrázek 9 – Piezorezistivní akcelerometr

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} [\Omega] \quad (1.15)$$

kde: R – je elektrický odpor

$\rho$  – je měrný odpor materiálu

l – je délka odporového materiálu (tenzometru)

S – plocha průřezu odporového materiálu (tenzometru)

### 1.3.5 Kapacitní akcelerometr

Kapacitní akcelerometr využívá změny kapacity v závislosti na působícím zrychlení pomocí změny vzdálenosti elektrod deskových kondenzátorů dle známého vztahu (1.16). Využívá se diferenciálního zapojení kondenzátorů, kdy oba mají společnou elektrodu, která je zároveň pohyblivá, a zbylé dvě jsou pevně umístěny, tak jako na obrázku: Obrázek 10. Tohoto principu využívá většina MEMS akcelerometrů. (FRADEN, 2004)

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{S}{d} [F] \quad (1.16)$$

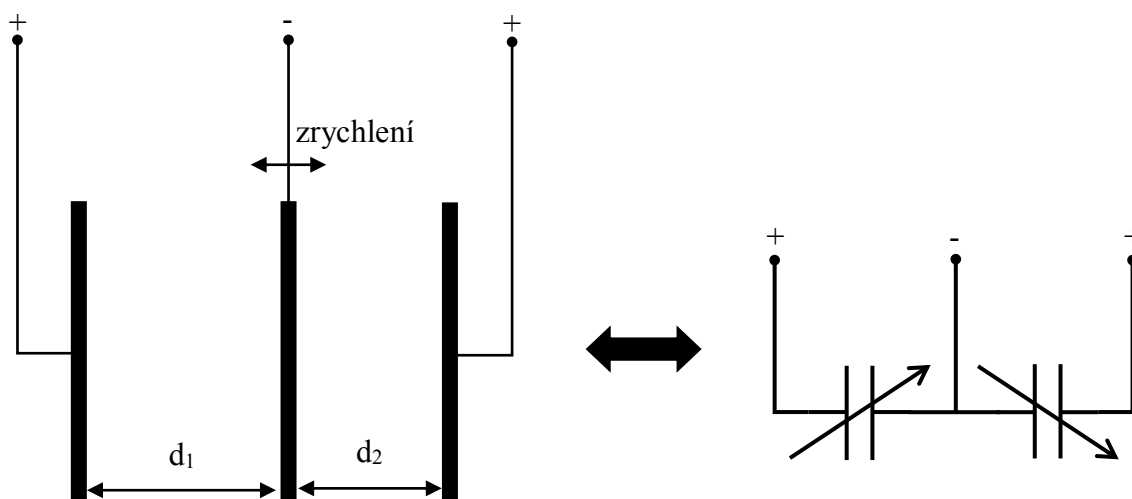
kde: C – je kapacita kondenzátoru

$\varepsilon_0$  – je permitivita vakua ( $8,854187818 \cdot 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$ )

$\varepsilon_r$  – je relativní permitivita prostředí

S – je plocha desek kondenzátoru

d – je vzdálenost mezi deskami kondenzátoru

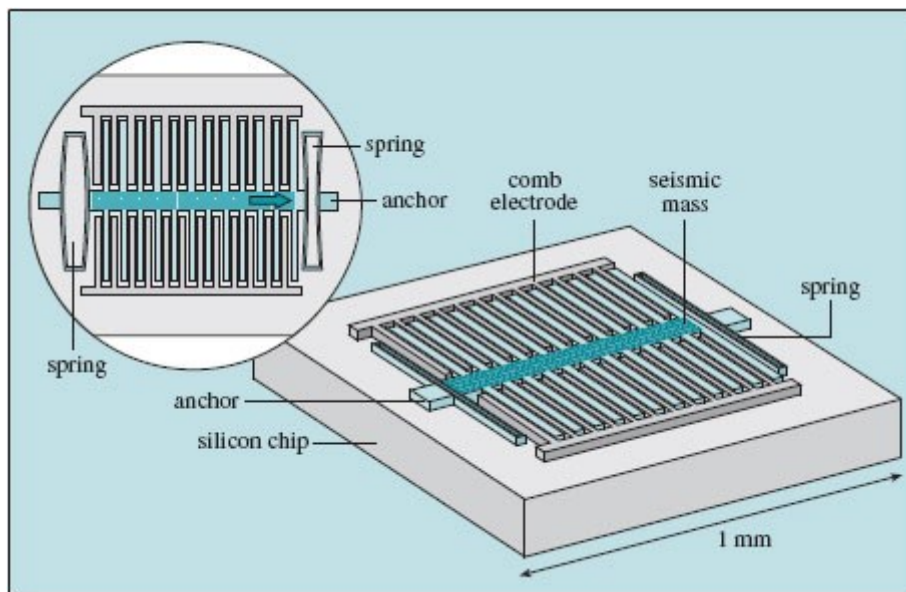


Obrázek 10 – Princip kapacitního akcelerometru

### MEMS technologie

MEMS senzory využívají zejména kapacitního snímání. Výhodou MEMS kapacitních akcelerometrů je možnost jejich výroby z polykrystalu křemíku bez nutnosti ostatních materiálů. To rapidně snižuje výsledný rozměr a hmotnost celého senzoru. Postupem vývoje dochází k prodlužování pohyblivých elektrod ve směru kolmém na měřící osu, což zvyšuje odstup signál/šum a snižuje křížovou citlivost (citlivost na ostatní měřící osy). Důležité je zajistit pokud možno lineární převodní charakteristiku s dostatečnou citlivostí. Citlivost není obtížný problém, stačí spojení více kondenzátorů paralelně. (VOJÁČEK, 2007).

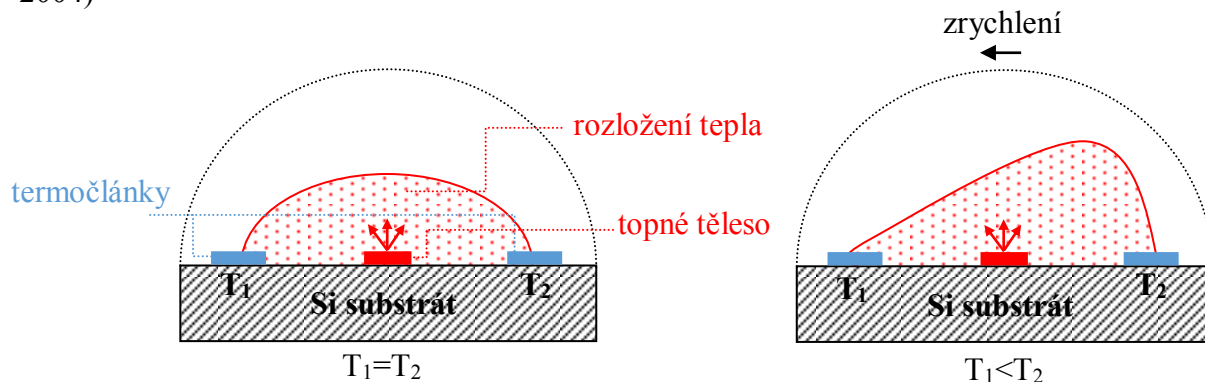
Na obrázku: Obrázek 11 je vyobrazen jednoosý MEMS akcelerometr. Jeho podkladem je křemíkový čip (silicon chip). Na tomto čipu jsou vytvarovány pevné hřebenové elektrody (comb electrode), které vystupují vzhůru. Další částí je pohyblivá část senzoru. Celé tělo pohyblivé části je upevněno ke křemíkovému čipu na okrajích pomocí ukotvení (anchor). Na tuto část navazuje pružina (spring), která umožňuje posunutí v závislosti na velikosti zrychlení, ale zároveň působí pomocí své tuhosti proti těmto zrychlení a omezí tak posun na určitou maximální hodnotu. Tyto křemíkové pružné části musí být konstruovány obzvláště pečlivě, neboť jsou vystaveny mechanickému namáhání a dochází k jejich opotřebení. Mezi párem pružin je umístěna seismická hmota (seismic mass), která uvádí celou součást do pohybu a zároveň je nosnou částí pro pohyblivé hřebenové elektrody, které společně s těmi pevnými tvoří řady diferenciálních kondenzátorů. (THE OPEN UNIVERSITY, 2013)



Obrázek 11 – MEMS kapacitní akcelerometr (THE OPEN UNIVERSITY, 2013)

### 1.3.6 Teplotní akcelerometr

Teplotní akcelerometr, zobrazený na obrázku: Obrázek 12, je další senzor zrychlení vyráběný technologií MEMS vyvinutý společností Memsic. Hlavním prvkem teplotního HGA akcelerometru je vyhříváný plyn, na který působí zrychlení. Topné těleso je vyhříváno na teploty až okolo 200 °C a následně je teplo přenášeno plynem ve směru zrychlení. Dalším krokem je monitorování rozprostření teploty v senzoru, která odpovídá jak zrychlení tak vzdálenosti od místa výhřevu. Monitorování je vyřešeno pomocí několika termočlánků. Výhodou těchto akcelerometrů je absence mechanických prvků, díky čemuž je akcelerometr odolný proti vysokým hodnotám zrychlení (až 50 000 g). Nevýhodou je především závislost na teplotě okolí a obtížné zkonstruování víceosých akcelerometrů, proto jsou dnes běžně dostupné pouze dvouosé senzory. Pro odstranění vlivu okolní teploty je použito teplotního senzoru, který bývá obvykle implementován již do obvodu senzoru. Akcelerometr je vhodný i pro měření statického zrychlení. (FRADEN, 2004)



Obrázek 12 – Teplotní HGA akcelerometr

## 1.4 Měření pomocí gyroskopu

Gyroskop je zařízení, jehož pomocí je možné měřit úhlovou rychlost rotačního pohybu. Právě proto se řadí mezi nejpoužívanější navigační senzory, které mají své nezastupitelné postavení především tam, kde se nelze spoléhat na dosah signálu například GPS navigačního systému nebo tam, kde chybí, či je jinak znehodnoceno geomagnetické pole, které využívají jiné druhy senzorů. (FRADEN, 2004)

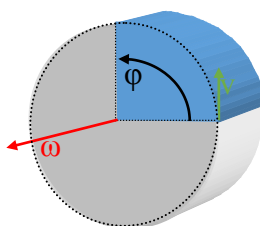
Základní typy a jejich dělení znázorňuje tabulka: Tabulka 2

Tabulka 2 – Rozdělení gyroskopů dle principu funkčnosti

Princip snímání	Druh gyroskopu
mechanické	Rotační gyroskopy Vibrační gyroskopy
na základě elektromagnetického vlnění	Optické gyroskopy
ostatní	Jaderné gyroskopy Kvantové gyroskopy

### 1.4.1 Úhlová rychlost a princip výpočtu úhlu náklonu

Úhlová rychlost je vektorová fyzikální veličina. Její vektor je kolmý k rovině kružnice, po níž obíhá hmotný bod rychlostí  $v$ , a umístíme ho do středu kružnice. Jeho směr určíme podle pravidla pravé ruky: Položíme-li prsty ke kružnici tak, aby prsty ukazovaly směr vektoru rychlosti  $v$ , pak vztyčený palec ukazuje směr vektoru úhlové rychlosti  $\omega$  (viz Obrázek 13). (REICHL, 2006-2013)



Obrázek 13 – Vektor úhlové rychlosti

Samotný výpočet úhlu náklonu je pouhou integrací úhlové rychlosti dle rovnice (1.17), kterou při dostatečně krátké změně času lze s určitou přijatelnou chybou počítat diskrétně dle rovnice (1.18). Problémem je však určení počátečního úhlu  $\varphi_0$ , který není možné pomocí gyroskopu určit, proto je nutné začínat měření z předem známé pevné pozice.

$$\varphi(t) = \varphi_0 + \int_0^t \omega(t) \cdot dt \quad (1.17)$$

$$\varphi(t) = \varphi_0 + \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \sum_{i=1}^{\frac{t}{\Delta t}} \omega_i \cdot \Delta t \quad (1.18)$$

kde:  $\varphi(t)$  – je měřený průběh úhlu náklonu

$\varphi_0$  – je počáteční úhel

$\omega(t)$  – je průběh úhlové rychlosti

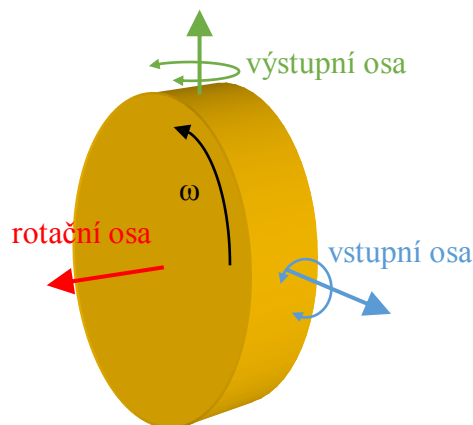
$\omega_i$  – je posloupnost diskrétních hodnot úhlové rychlosti, získaných z gyroskopu

$\Delta t$  – je časový rozestup mezi jednotlivými vzorky  $\omega_i$

### 1.4.2 Rotační gyroskop

Základem pro funkčnost rotačního gyroskopu je rotující setrvačnick. Jako setrvačnick je použito masivního disku či obruče konstruovaného tak, aby jeho moment hybnosti byl co nejvyšší. Osa setrvačnicku, která je zároveň jeho osou otáčení, je nejčastěji upevněna v Cardanových závěsech, které jsou propojeny ve třech vzájemně kolmých osách a dávají tak celé konstrukci tři stupně volnosti. Rotující setrvačnick uchovává stejný směr osy rotace do doby, než na ní začne působit síla, která by jí z této rovnováhy vychýlila. Toto je dáno Newtonovým zákonem setrvačnickosti. (FRADEN, 2004)

Setrvačnick se otáčí kolem své rotační osy úhlovou rychlostí  $\omega$  tak, jak je tomu na obrázku: Obrázek 14. Je-li okolo vstupní osy působeno na rotační osu momentem síly  $T$ , dojde k rotaci rotační osy okolo výstupní osy úhlovou rychlostí  $\Omega$  dle rovnice (1.19).



Obrázek 14 – Rotační gyroskop



$$T = I \cdot \omega \cdot \Omega \quad (1.19)$$

kde  $T$  – je moment síly působící okolo vstupní osy

$I$  – je setrvačnost gyroskopu

$\omega$  – je úhlová rychlost setrvačnicku kolem rotační osy

$\Omega$  – je úhlová rychlost obíhání rotační osy kolem výstupní osy

### 1.4.3 Vibrační gyroskop

Vibrační gyroskopy odstraňují nevýhodu přesných, rozměrově velkých součástí rotačních gyroskopů, které i se svým zavěšením nejsou vhodné pro komerční použití. Vibrační gyroskopy nahrazují setrvačnicku pomocí periodicky udržovaného kmitání seismické hmoty o přesné známé hmotnosti. Tím jsou výrazně zmenšeny rozměry senzoru a kmitavé prvky je možno vyrábět i technologií MEMS. Celý princip vibračních gyroskopů spočívá ve snímání Coriolisovy síly, která působí na libovolný hmotný předmět či objekt, který se pohybuje rychlostí  $v$  v soustavě rotující kolem osy rotace úhlovou rychlostí  $\omega$ . Velikost a směr Coriolisovy síly je dán vektorovým součinem rychlosti a úhlové rychlosti podle vztahu (1.20). (VOJÁČEK, 2009)

$$F_C = 2 \cdot m \cdot v \times \omega [N] \quad (1.20)$$

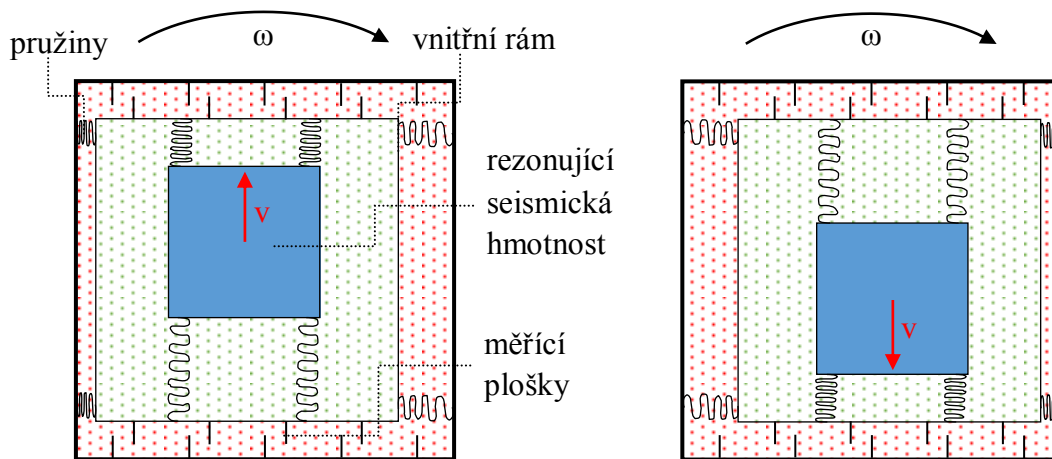
kde:  $F_C$  – je Coriolisova síla

$m$  – je hmotnost kmitající seismické hmoty

$v$  – je rychlost pohybu seismické hmoty

$\omega$  – je úhlová rychlost senzoru okolo měřené osy

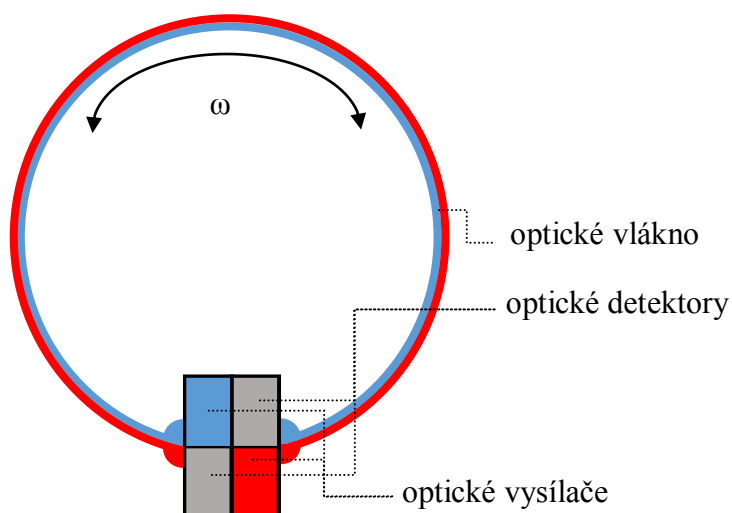
Na obrázku: Obrázek 15 je základní prvek rezonující seismické hmotnosti o přesné známé hmotnosti, která je pomocí pružin upevněna do vnitřního rámu senzoru. Při rotaci systému úhlovou rychlostí  $\omega$  působí na vnitřní rám Coriolisova síla, která způsobí namáhání bočních pružin a posun vnitřního rámu. Směr posunu vnitřního rámu závisí na směru úhlové rychlosti a směru rychlosti seismické hmoty (aktuální fázi periodických kmitů seismické hmoty). Posunutí vnitřního rámu je měřeno prostřednictvím měřících plošek, jejichž vzájemné posunutí vyvolá změnu kapacity deskových kondenzátorů, které tyto plošky tvoří.



Obrázek 15 – Vibrační gyroskop

#### 1.4.4 Optický gyroskop

Jedná se o velmi přesné gyroskopy, které dokáží detekovat i malé úhlové rychlosti. Princip jejich činnosti je založen na Sagnacově interferometru, kdy jsou ve vzájemně opačných směrech do optického vlákna smotaného do kružnice poslány laserové paprsky. Dojde-li během průletu paprsků optickým vláknem k otáčení vlákna okolo osy kruhu, do kterého je vlákno ohnuto, změní se jednotlivé vzdálenosti obou paprsků, které stihnou urazit za stejný časový okamžik. Z tohoto rozdílu vzdáleností lze vyjádřit průměrnou úhlovou rychlost. Za předpokladu krátké doby průletu paprsků vláknem lze tuto hodnotu úhlové rychlosti považovat za okamžitou. Tento předpoklad je možno pro optické paprsky považovat za splněný (FRADEN, 2004). Principiální schéma optického senzoru je na obrázku: Obrázek 16.



Obrázek 16 – Optický gyroskop

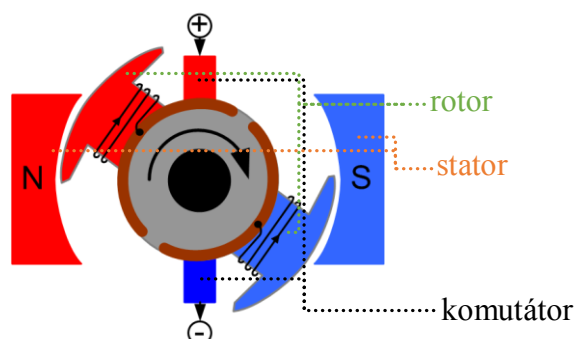
## 2 Typy pohonu kol elektromotory

Elektromotorů použitelných pro pohon robotů a jiných zařízení je možno použít hned několik druhů. Ovšem každý druh je vhodný pro nepatrně odlišná použití. Existují stejnosměrné motory a i střídavé motory, ale ty nebudou uvažovány, jelikož pro malá robotická zařízení, často napájená stejnosměrným napětím, není jejich použití obvyklé. Jednotlivé typy motorů se liší především výkonem, rychlostmi, rozměry hmotností a v neposlední řadě také způsoby řízení a cenou. V této kapitole budou některé druhy elektromotorů podrobněji popsány.

### 2.1 Stejnosměrné motory s komutátorem

Tento druh DC motoru je pro pohon mobilních robotů velmi často používán. Jeho předností je snadné řízení, kdy pro jeho roztočení postačí na jeho kontakty přivést jmenovité napětí a směr rotace lze snadno změnit pouze změnou orientace napětí na vstupních svorkách. Rychlost rotací lze korigovat velikostí přiloženého stejnosměrného napětí či jeho střední hodnotou. Nepatrnou nevýhodou bývají vyšší pracovní otáčky a nízký moment síly na těchto otáčkách. Proto jsou často doplněny převodovkou, která sníží pracovní otáčky a zvýší moment síly. Obtížnější je pak využití pro polohové řízení. V běžných případech DC motorů se jedná o dostupné levné modely. (NOVÁK, 2005)

DC motor (na obrázku: Obrázek 17) se skládá z rotoru, statoru a komutátoru. Stator je téměř vždy tvořen permanentními magnety orientovanými opačnými póly proti sobě. Druhou téměř nepoužívanou variantou by byla dvojice opačně orientovaných cívek buzená stejnosměrným napětím, která by vytvořila stejné magnetické pole jako magnety. Rotor se skládá z pólových nástavců na kterých jsou navinuty cívky. Konce těchto cívek jsou vyvedeny na kruhovou lištu kontaktů a jsou umístěny naproti sobě. Kontakty jsou pak třeny přes vodivé komutátory, na které je přivedeno stejnosměrné budící napětí. Při otáčení tak dochází k přepólování cívek a tím je umožněna kontinuální rotace rotoru, jehož osa je vyvedena z krytu samotného motoru.

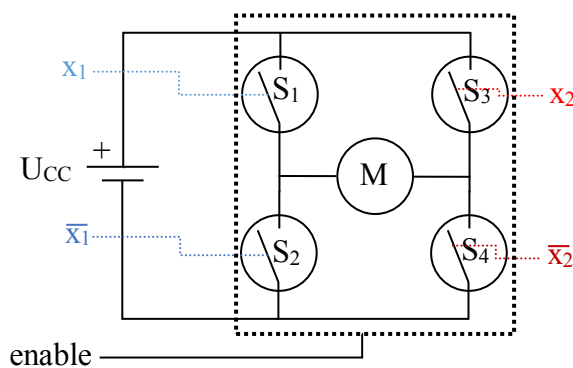


Obrázek 17 – Stejnosměrný komutátorový motor (Wikimedia Foundation, 2007)

### 2.1.1 Řízení stejnosměrného komutátorového motoru

Řízení stejnosměrného motoru lze provádět mnoho způsoby. Základním a nejjednodušším, ale také energeticky nejméně vhodným způsobem je spjitá změna napětí motoru. Mnohem výhodnější je využití řízení pomocí PWM. K tomuto účelu je v dnešní době vyráběna spousta integrovaných obvodů. Mezi ně patří i takzvané H-můstky. Nejkomplexnější variantou je plný H-můstek, který je schopen řídit jak otáčky, tak jejich směr. Jejich hlavní výhodou ve spojení s PWM je vysoká účinnost, nízké výkonové ztráty a také jejich dostupnost i pro vysoké výkony. Jejich nevýhodou je pak především vznik elektromagnetického rušení. (NOVÁK, 2005)

Schéma takového řídicího obvodu H-můstku je na obrázku: Obrázek 18. Při přivedení kladné logické hodnoty na vstup enable (zpřístupnění) dojde k aktivaci celého řídicího integrovaného obvodu. Na tento pin je právě obvykle přiveden řídicí signál PWM, který dle potřeby aktivuje zařízení a tím určuje střední hodnotu napětí motoru a tím pádem určuje jeho otáčky. Aby se motor otáčel, je za potřebí nastavit směr otáčení. K tomuto účelu slouží čtveřice spínačů  $S_1$  až  $S_4$ . Tyto spínače jsou ovládány pomocí vstupů  $x_1$  a  $x_2$  a jejich negací. Aby se motor otáčel, je nutné, aby hodnoty řídicích vstupních signálů  $x_1$  a  $x_2$  nabývali opačných logických stavů. Situace, kdy obě proměnné nabývají stejné logické hodnoty, mohou být řešeny různě, v některých případech mohou být tyto stavy i zakázány. Existují tedy dva aktivní stavy. Ten první nastává při aktivních hodnotách enable,  $x_1$ ,  $\overline{x_2}$ , kdy se proud uzavírá přes spínač  $S_1$ , motor a spínač  $S_4$  a motor se roztočí jedním směrem. Druhý stav nastane při aktivních hodnotách enable,  $x_2$ ,  $\overline{x_1}$ , kdy se proud uzavře přes spínač  $S_3$ , motor a spínač  $S_2$  a roztočí motor směrem opačným. Spínače jsou v reálných obvodech řešeny bipolárními či unipolárními spínacími tranzistory, které jsou schopny spínat s dostatečnou rychlostí.



Obrázek 18 – Princip H-můstku

## 2.2 Stejnoseměrné motory bez komutátoru

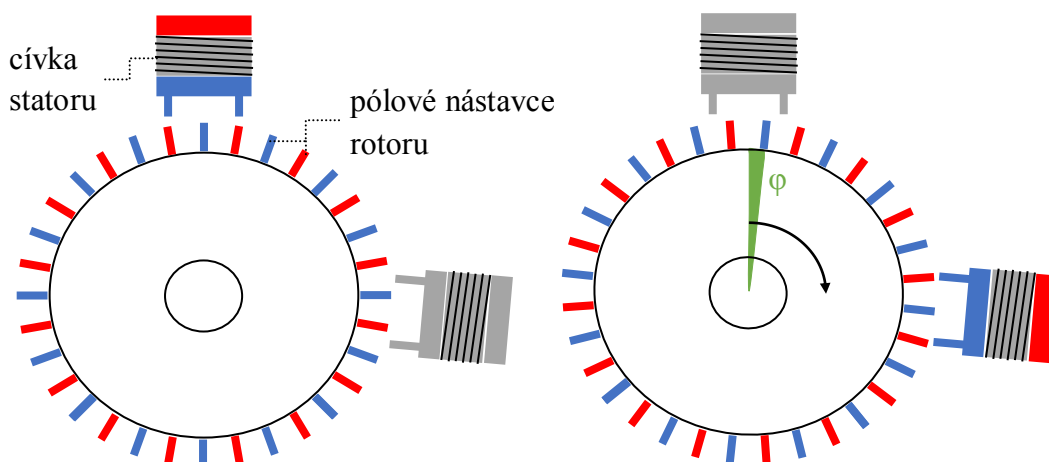
Stejnoseměrné motory bez komutátoru nebo také zkráceně BLDC motory se svým principem činnosti do jisté podoby podobají střídavým motorům. Jejich rotor je tvořen permanentním magnetem, tvořeným materiálem na bázi vzácných zemin, a stator sérií několika vinutí, zapojených do hvězdy či trojúhelníku, která je nutné vhodně spínat. Právě pro vhodné spínání je nutné zajistit zpětnou vazbu, která ošetří situace, kdy by vytvořené rotující magnetické pole vinutími statoru rotovalo natolik rychle, že by jej rotor vlivem zátěže nebyl schopen následovat. Proto mnozí výrobci již tyto motory dodávají i s řídicími mikroprocesory a regulace otáček či směru je pak například otázkou analogové úrovně napětí na některém ze vstupů mikroprocesoru. Ke spínání jednotlivých vinutí statoru může být využito totožných H-můstek jako u komutovaných stejnosměrných motorů. Výhodou těchto motorů je jejich dlouhá životnost, která je prakticky dána kvalitou mechanických částí jako jsou ložiska, a jejich bezúdržbovost, při které není potřeba kontrolovat a měnit kontakty komutátorů. Jejich nevýhodou je obtížnější řízení a tudíž i celkové vyšší náklady. (ING. ŠIMON, 2011)

## 2.3 Krokové motory

Tento typ motorů je specifický, jak již ze svého názvu vyplývá, svým způsobem rotace po konstrukčně daných krocích, kdy jednomu kroku odpovídá jistý přesný úhel otočení. Tím je dána jeho největší výhoda a to znalost přesné polohy hřídele, bez nutnosti nějakého senzorického snímání, v případě že není motor přetěžován. Proto jsou krokové motory používány hromadně k přesnému řízení polohy, jako například u CNC fréz, čtecích hlaviček pevných disků počítačů. Linearizované modifikace tohoto motoru pak využívají například i některé tiskárny pro pohyb svých tiskových hlav. Jejich hlavní nevýhodou je stálý odběr proudu i v případě, že se motor neotáčí a je pouze udržován v současném stavu, a nutnost použití řídicí logiky. (NOVÁK, 2005)

Základní krokový motor je nakreslen na obrázku: Obrázek 19. Krokové motory se skládají ze statoru, který je tvořen několika vinutími (minimálně však dvěmi), jejichž jádra jsou zakončena několika zuby, a rotoru, jehož hlavním prvkem jsou po obvodu nakladené polové nástavce permanentních magnetů. Sousední nástavce mají vždy opačnou magnetickou polaritu. Přivedení napětí jakékoli polarity na některé z vinutí způsobí stabilizaci natočení rotoru. Zuby horní cívký, při své polarizaci dle obrázku, budou nejvíce přitahovat nejbližší severní (červený) pól rotoru a zároveň nejvíce odpuzovat nejbližší jižní (modrý) pól rotoru. Výsledek stabilizace je vidět v levé části obrázku. Pokud je zapotřebí s motorem začít otáčet, může nastat více situací. První, plný krok motoru nastane pokud původní cívký odpojíme od napájení a na druhou cívký přivedeme napětí orientované dle vyžadovaného směru otáčení. Na obrázku je znázorněn směr dle hodinových ručiček, proto jsou zuby druhé cívký polarizovány jako jižní pól a dojde k otočení o úhel  $\varphi$ , který znázorňuje jeden krok. Při pokračování rotace by došlo k polarizaci horní cívký jako severní pól a následně pak i praví cívký. Druhým případem je poloviční krok motoru, který mezi jednotlivé stavy, kdy je sepnuto vždy pouze jedno vinutí, vkládá stav

s oběma seplými vynutími. Toho docílíme vzájemným posunutím řídicích signálů cívek o polovinu doby pulzu oproti plnému kroku. Výsledkem je pak plynulejší rotace.



Obrázek 19 – Princip krokového motoru

## 2.4 Servomotory

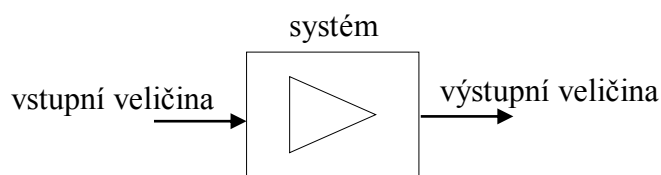
Servomotor nebo také zkráceně servo je zařízení skládající se ze stejnosměrného motoru, převodovky a řídicího obvodu, jehož potenciometr, zajišťující zpětnou vazbu, je konstrukčně spřažen s výstupní hřídelí. Tyto motory slouží k přesnému natočení hřídele podobně jako krokové motorky. Na rozdíl od krokových motorů je ale otočení hřídele omezeno. Obvykle se jedná o úhel  $\pm 90^\circ$  od rovnovážné polohy. Celé servo je řízeno pomocí PWM. Perioda PWM signálu je u většiny výrobců pevně stanovena na 20 ms. Úhel natočení je pak úměrný šířce pulzu, který bývá výrobcem stanoven v rozmezí intervalu  $\langle 1 \text{ ms}, 2 \text{ ms} \rangle$ , kde dolní hranice symbolizuje maximální natočení v jednom směru a horní mez maximální natočení v druhém směru. Prostřední hodnota tohoto rozsahu pak odpovídá nulovému natočení. O ustálení úhlu natočení se postará řídicí obvod pomocí potenciometru. Řídicím obvodem může být například monostabilní klopný obvod, který společně s hodnotou odporu potenciometru bude generovat různě široké pulzy, které budou následně porovnány s řídicím signálem a jejich rozdíl pak sloužit jako vstup pro motor. (NOVÁK, 2005)

### 3 Metody regulace výstupní veličiny

Regulaci výstupní veličiny lze provádět několika metodami, které jsou závislé na způsobu funkce celého systému. Pokud potřebujeme řídit nějaký systém, který je pod kontrolou obsluhy, která celý proces ovládá a kontroluje, postačí využití regulace bez zpětné vazby. Pokud se ale jedná o ryze automatizovaný systém, je nutné využití zpětné vazby, pomocí které docílíme přesně požadované výstupní veličiny s jistou časovou odezvou.

#### 3.1 Regulace bez zpětné vazby

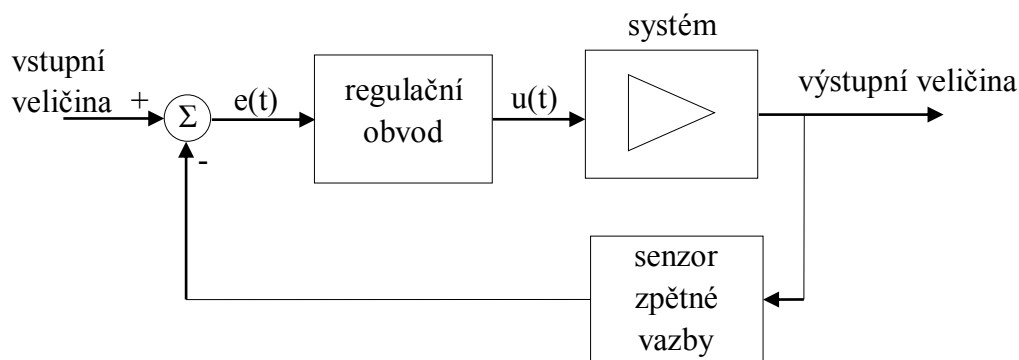
Jedná se o nejjednodušší způsob regulace, který ovšem není vhodný pro automatizované systémy. Jde vlastně o přímé nastavení vstupní veličiny systému, vypočtené na základě znalosti požadované výstupní veličiny a odezvy systému. Blokové schéma takového způsobu je na obrázku: Obrázek 20.



Obrázek 20 – Regulace bez zpětné vazby

#### 3.2 Regulace se zpětnou vazbou

Blokové schéma regulátoru se zpětnou vazbou je na obrázku: Obrázek 21. Základem regulátoru se zpětnou vazbou je zpětnovazební senzor, který snímá výstupní veličinu. Rozdíl vstupní veličiny, která vyjadřuje požadovanou hodnotu výstupní veličiny, a sejmuté výstupní veličiny se nazývá regulační odchylka. Regulační odchylka je rozhodující vstupní parametr, jehož pomocí regulační obvod vypočítává regulační funkci. Jako regulační obvod se standardně používá PID regulátor, případně jen jeho části dle potřeby (P,PI,PD,I regulátory). (ŠULC, a další, 2004)



Obrázek 21 – Regulátor se zpětnou vazbou

### 3.2.1 Proporcionální regulátor

Jedná se o nejjednodušší regulátor. Regulační funkce je dána pouhým zesílením regulační odchylky. Je-li regulační odchylka nulová, dosáhli jsme požadovaného stavu a regulační funkce bude též nulová. To může představovat problém v případech, ve kterých je za potřebí, aby při nulové regulační odchylce nebyla regulační funkce nulová. Toto řeší jiné regulátory. Jeho hlavní nevýhodou jsou překmity výstupní veličiny a delší doba ustálení kmitů. Průběh regulační funkce tohoto regulátoru je dán rovnicí (3.1). Příklad proporcionálně regulované výstupní veličiny je na obrázku: Obrázek 22. (ŠULC, a další, 2004)

$$u(t) = K_p \cdot e(t) = K_p \cdot (w(t) - y(t)) \quad (3.1)$$

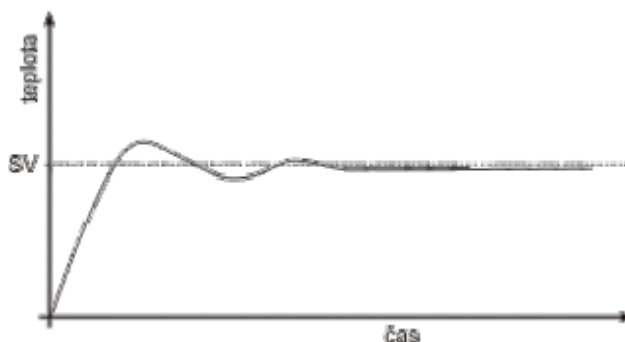
kde:  $u(t)$  – je regulační funkce

$K_p$  – je zesílení proporcionální složky

$e(t)$  – je regulační odchylka

$w(t)$  – je vstupní veličina

$y(t)$  – je výstupní veličina



Obrázek 22 – Výstupní veličina P regulátoru (MRK s.r.o., -2013)

### 3.2.2 Proporcionálně-Integrační regulátor

Jedná se o nejrozšířenější regulátor. Tento regulátor oproti proporcionálnímu regulátoru přidává integrační složku, která odstraňuje nedostatek v potřebě nenulové regulační funkce při nulové regulační odchylce. Snižuje dobu nastavení požadované ustálené hodnoty a odstraňuje konstantní odchylku od požadované veličiny. Stále ovšem zůstává problém překmitů. V počátku regulace převládá proporcionální složka a s postupem času začíná převládat vliv integrační složky. Průběh regulační funkce regulátoru je dán rovnicí (3.2). Výsledek po řízení proporcionálně integrovaného regulátoru je na obrázku: Obrázek 23

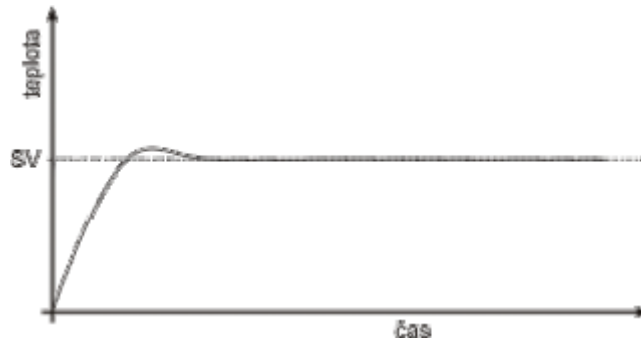


$$u(t) = K_P \cdot e(t) + K_I \cdot \int_0^t e(t) \cdot dt \quad (3.2)$$

kde:  $u(t)$  – je regulační funkce

$K_P, K_I$  – je zesílení proporcionální a integrační složky

$e(t)$  – je regulační odchylka



Obrázek 23 – Výstupní veličina PI regulátoru (MRK s.r.o., -2013)

### 3.2.3 Proporcionálně-Integračně-Derivační regulátor

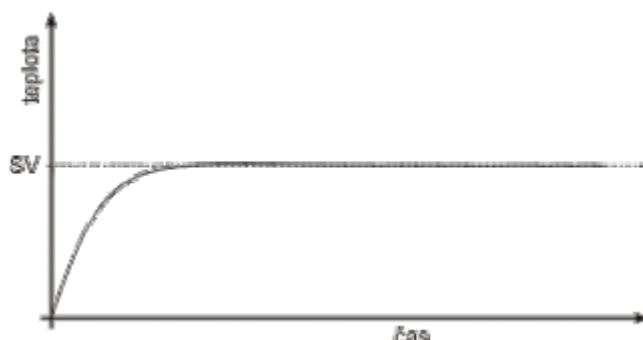
Jedná se o regulátor, který nejnějněji reguluje výstupní veličinu. Tento regulátor přidává poslední vylepšení původního proporcionálního regulátoru a to sice přidáním derivační složky, která má za úkol odstranit anebo alespoň výrazně utlumit překmity výstupní veličiny. Před použitím derivační složky jako takové, je za potřeby odstranit vysoké frekvence, na kterých se nachází šum. Jsou-li správně nastaveny konstanty zesílení jednotlivých složek, průběh výstupní veličiny vykazuje dostatečnou strmou při skokových změnách vstupní veličiny, nedochází k překmitům, konstantní odchylka ustáleného stavu je odstraněna, jak je vidno z obrázku: Obrázek 24. Průběh regulační funkce regulátoru je dán rovnicí (3.3).

$$u(t) = K_P \cdot e(t) + K_I \cdot \int_0^t e(t) \cdot dt + K_D \cdot \frac{d}{dt} e(t) \quad (3.3)$$

kde:  $u(t)$  – je regulační funkce

$K_P, K_I, K_D$  – je zesílení proporcionální, integrační a derivační složky

$e(t)$  – je regulační odchylka



Obrázek 24 – Výstupní veličina PID regulátoru (MRK s.r.o., -2013)

### 3.2.4 Nastavení konstant zesílení složek regulátoru

Nastavení pomocí metody Ziegler-Nichols vyžaduje v prvním kroku nastavení konstant  $K_I$ ,  $K_D$  rovno nule. Nastavení spočívá ve změně zbývajících konstant  $K_P$ , která je měněna dokud výstupní veličina nebude oscilovat netlumenými kmity kolem rovnovážné hodnoty. Při dosažení těchto oscilací je aktuálně nastavená konstanta zesílení rovna  $K_U$  a ze záznamu kmitů odečteme periodu oscilací  $P_U$ . Přepočítání reálných konstant jednotlivých regulátorů pomocí předešlých dvou zmíněných hodnot znázorňuje Tabulka 3. (Wikimedia Foundation, 2013)

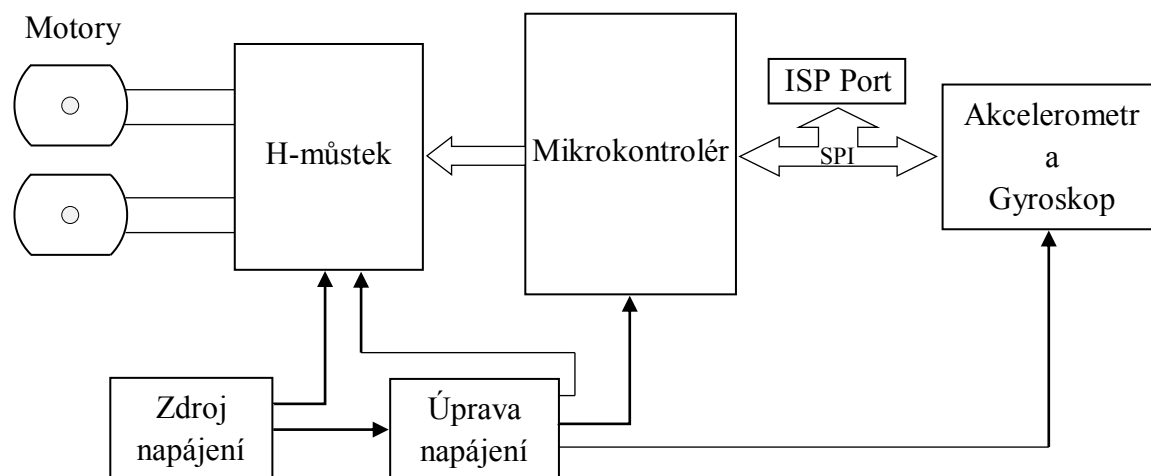
Tabulka 3 – Konstanty zesílení složek regulátorů (Wikimedia Foundation, 2013)

Regulátor	$K_P$	$K_I$	$K_D$
<b>P</b>	$0,5 \cdot K_U$	0	0
<b>PI</b>	$0,45 \cdot K_U$	$1,2 \cdot (K_P/P_U)$	0
<b>PID</b>	$0,6 \cdot K_U$	$2 \cdot (K_P/P_U)$	$(K_P \cdot P_U)/8$

## 4 Praktická realizace robota

Robot je sestaven z několika vzájemně propojených a komunikujících částí přesně tak, jak znázorňuje blokové schéma na obrázku: Obrázek 25. Vstupem obvodu jsou tříosé senzory akcelerometru a gyroskopu, které snímají zrychlení a otáčení konstrukce robota. Pro tuto konstrukci byla zvolena součástka LSM330DLC společnosti STMicroelectronics, která integruje oba tyto senzory do jediného pouzdra. Senzor komunikuje s mikrokontrolérem pomocí SPI. Jako řídicí člen je použit mikrokontrolér AVR řady ATmega 48/88/168/328 společnosti Atmel, který plně svými vlastnostmi a cenou vyhovuje pro tuto aplikaci. Mikrokontrolér přijme naměřená data a provede jejich přepočítání na úhel odklonu, který následně reguluje na požadovanou nulovou hodnotu. Spínání motorů zařizuje H-můstek, který je ovládán mikrokontrolérem pomocí několika řídicích pulzů, mezi nimi například PWM, pro nastavení výkonu. Mikrokontrolér je možné naprogramovat pomocí ISP portu a připojením některého z ISP programátorů určeného pro tento procesor. Napájení mikrokontroléru a senzoru a logické části H-můstku je upraveno stabilizátorem. Výkonová část H-můstku je napájena přímo ze zdroje napětí z důvodu vysokého proudového odběru a jiného napětí potřebného pro motory.

Jednotlivé části blokového schématu robota jsou podrobněji popsány v následujících podkapitolách.



Obrázek 25 – Blokové schéma robota

## 4.1 Mikrokontrolér

Pro řízení chodu robota byl vybrán mikrokontrolér AVR řady ATmega 48/88/168/328 výrobce Atmel. Jedná se o dostupný levný osmibitový mikrokontrolér s harvardskou architekturou, která je typická oddělenou pamětí programu od paměti dat. Mikrokontrolér je typu RISC, díky čemuž je zjednodušena konstrukční náročnost jádra mikrokontroléru, který tak hardwarově nepodporuje některé, mnohdy málo využívané, specifické operace a je nutné je nahradit sérií jednodušších instrukcí. Na mikrokontrolér je z důvodu správné funkce zařízení a komunikace s ostatními částmi robota kladeno několik požadavků, které zvolený mikrokontrolér bez potíží splňuje. Je to především možnost komunikace pomocí SPI nebo I2C s obvodem senzoru. S tím je spojená možnost přeprogramování mikrokontroléru, již zapájeného v zařízení, pomocí ISP. Dále je za potřebí, aby mikrokontrolér umožňoval vyvolat přerušování některými ze svých pinů, čehož využijeme při komunikaci se senzorem. Pro snadné řízení H-můstku je využito PWM výstupu obvodu čítače a časovače mikrokontroléru. V neposlední řadě je požadavek na dostupnost několika logických vstupně-výstupních pinů. Výhodou mikrokontroléru je široký rozsah napájecího napětí od 2,7 V do 5,5 V, čímž je částečně překryt rozsah napájecího napětí senzoru, jehož napájecí napětí je v rozsahu od 2,4 V do 3,6 V. Jejich napěťové úrovně logických stavů jsou tak při zvoleném napájecím napětí 3,3 V vzájemně kompatibilní. (ATMEL CORPORATION, 2011)

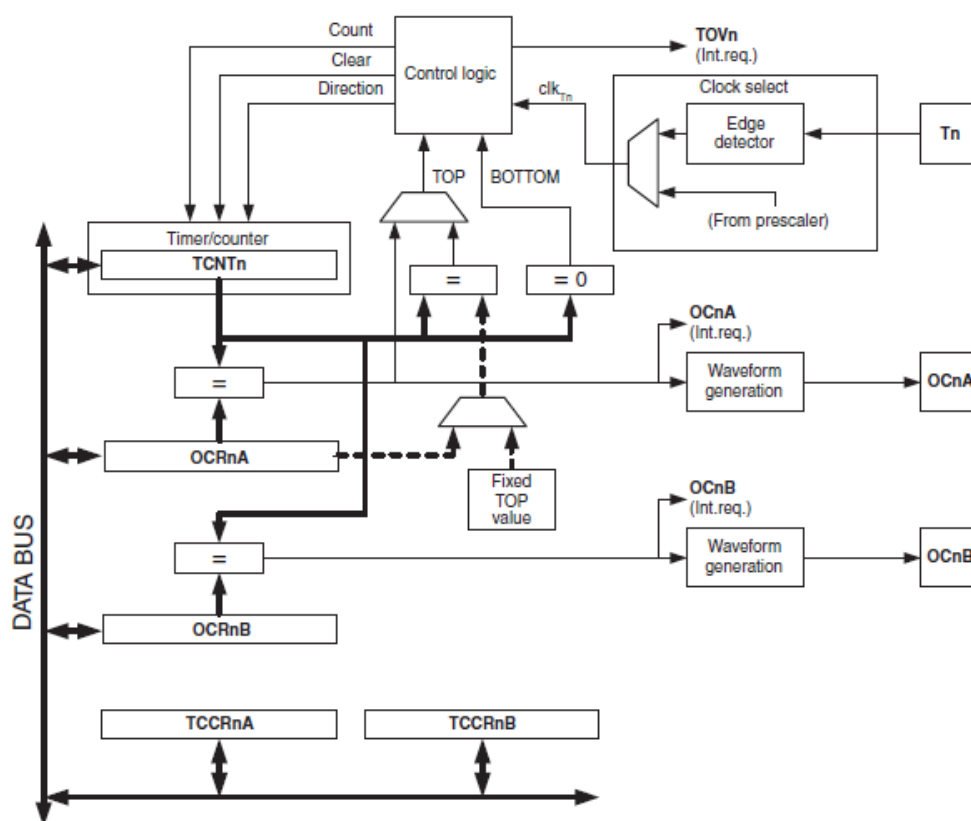
### 4.1.1 Parametry ATmega 48/88/168/328

Všechny níže vypsány parametry jsou získány z datasheetu dané součástky uvedeného v seznamu použité literatury jako citace (ATMEL CORPORATION, 2011).

- 131 instrukcí v instrukční sadě
- 32 osmibitových univerzálních pracovních registrů
- 4/8/16/32 KB Flash paměť programu s 10000 přepsáními pomocí ISP
- 256/512/512/1000 B EEPROM datové paměti se 100000 přepsáními
- 512/1K/1K/2K B SRAM datové paměti
- 2 osmibitové čítače/časovače, 1 šestnáctibitový čítač časovač
- 6 PWM výstupů
- minimálně 6 vstupů multiplexovaného desetibitového A/D převodníku
- komunikace pomocí USART, SPI, TWI (kompatibilní s I2C)
- 23 programovatelných I/O pinů
- vnitřní RC oscilátor s frekvencí 8MHz (předdělička standardně na 1 MHz)
- 5 režimů spánku
- frekvenční rozsah 0-10 MHz při napájení 2,7-5,5 V nebo 0-20 MHz při 4,5-5,5 V
- pracovní teplota -55 °C až +125 °C

#### 4.1.2 PWM výstup čítače/časovače

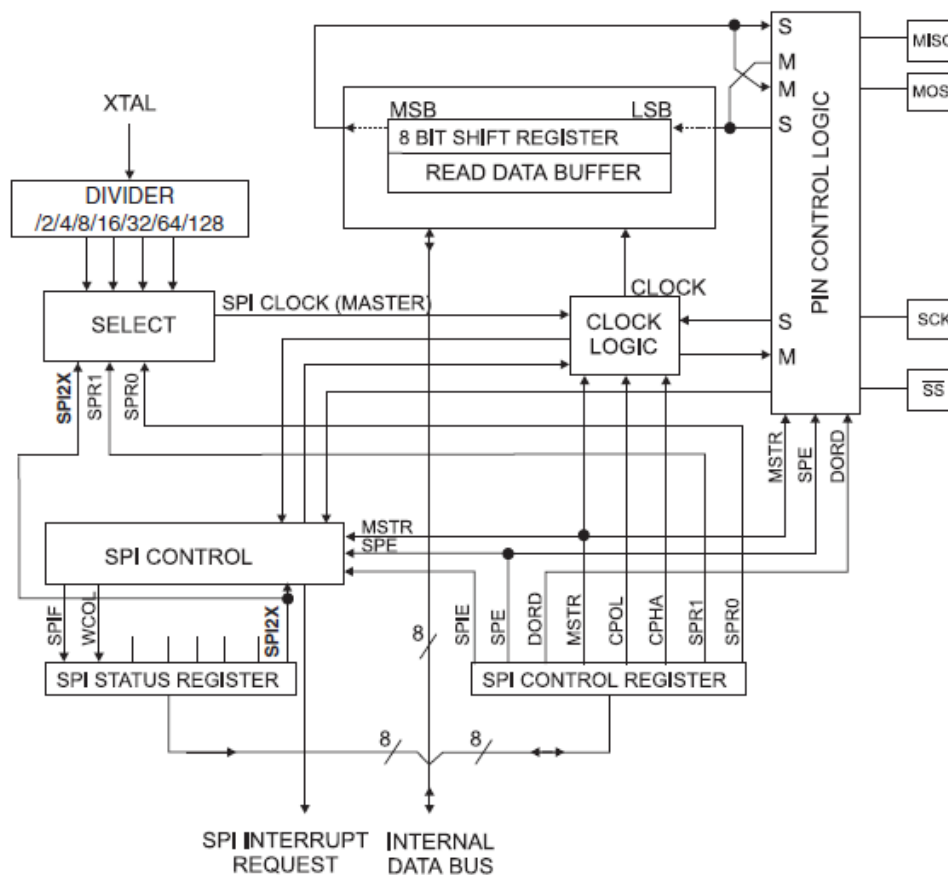
Čítač je obvod, který počítá impulzy vnějšího signálu a měří tak jeho frekvenci. Časovač čítá pevný kmitočet. Z počtu načítaných impulzů lze pak vyjádřit dobu čítání a tedy měřit čas. Blokové schéma čítače/časovače použitého mikrokontroléru je na obrázku: Obrázek 26. Základem pro obvod čítače/časovače je hodinový signál. Zdroj hodinového signálu je určen nastavením bitů CS02-CS00 v registru TCCRnB. Buď je použit hodinový signál celého mikrokontroléru, s možností zařazení předděličky nebo externí zdroj přivedený na pin T0. Pro zpřístupnění daného výstupního pinu (OCnA, OCnB) je nutné jej nastavit jako výstupní. Nastavením bitů WGM02-WGM00 v registrech TCCRnA a TCCRnB je dána jeho funkce jako PWM výstupu. Na výběr je z variant fázově korektní PWM a rychlé PWM. Posledním krokem v nastavení je výběr mezi invertujícím a neinvertujícím módem pomocí bitů COMnA1 a COMnA0 (případně varianta COMnB1 a COMnB0 pro výstup OCnB) v registru TCCRnA. Neinvertující mód udržuje výstup v logické 1, dokud je porovnávána hodnota v registru OCRnA (případně OCRnB) vyšší než načítaná hodnota v registru TCNTn. Invertující mód naopak udržuje výstup na hodnotě logické 0. Po nastavení všech výše uvedených parametrů stačí ke generování a změně šířky pulzu PWM signálu ukládat požadované komparační úrovně do registru OCRnA (případně OCRnB). (ATMEL CORPORATION, 2011)



Obrázek 26 – Blokové schéma čítače/časovače (ATMEL CORPORATION, 2011)

### 4.1.3 SPI komunikace

SPI kanál využívá ke komunikaci třívodičový, plně duplexní synchronní datový přenos. Zařízení může být ve dvou stavech. Stavem prvním je master mód, kdy toto zařízení řídí a iniciuje komunikaci. Druhým stavem je slave mód, kdy zařízení čeká, až bude vyzváno ke komunikaci pomocí pinu  $\overline{SS}$ . Výběr z těchto módů je dán bitem MSTR v SPCR registru. V aplikaci robota je nutný master mód a bit je tedy nastaven na logickou 1. Dále je třeba nastavit vstupně-výstupní piny MOSI a SCK jako výstupní a MISO jako vstupní pomocí odpovídajícího DDRB registru. Dále je nutné nastavit polaritu signálu SCK pomocí bitů CPOL a CPHA v registru SPCR. Ve stejném registru je za potřeby nastavit bit DORD, který udává zda první odeslaný bit bude LSB či MSB. Zásadní informací je nastavení SPR0, SPR1 a SPI2X v registrech SPCR a SPSR, které udávají dělicí poměr mezi frekvencí oscilátoru a frekvencí hodinového signálu pinu SCK. Pro zpřístupnění a aktivování komunikátoru je potřeba povolit enable pin SPE v registru SPCR. Možné je využití SPIF flagu v registru SPSR, který oznamuje dokončení přenosu bloku dat. Nejdříve ovšem musí být tento flag povolen bitem SPIE v registru SPCR. Nyní je vše nastaveno a připraveno ke komunikaci. Pro její zahájení stačí vyzvat nějaké slave zařízení tím, že na jeho  $\overline{SS}$  pin nastavíme logickou 0. Následně stačí zapsat data do posuvného SPDR registru, kde si po úspěšné komunikaci také vyzvedneme přijatá data od slave zařízení (ATMEL CORPORATION, 2011). Výše popisované zařízení komunikátoru je na obrázku: Obrázek 27.



Obrázek 27 – Blokové schéma SPI části (ATMEL CORPORATION, 2011)

## 4.2 Akcelerometr a gyroskop

Pro realizaci robota je využit senzor nezávislého tříosého akcelerometru a gyroskopu LSM330DLC dodávaného společností STMicroelectronics. Díky využití MEMS technologií je možné tento senzor minimalizovat do rozměrů pouzdra LGA 28L o rozměrech 4 x 5 x 1,1 mm. Senzor je osazen interním převodníkem a je schopen předávat naměřená data v digitální podobě pomocí SPI/I2C komunikačního portu. Použitý převodník je šestnácti bitový a výsledky převodu jsou uloženy vždy do dvojice osmibitových registrů. Pro každou měřicí osu akcelerometru i gyroskopu jsou vyhrazeny dva osmibitové registry, do kterých jsou naměřená data uložena. Rozsah akcelerometru je možno zvolit ze čtyř nabízených variant a u gyroskopu je výběr ze tří variant, pomocí bitů FS1 a FS0 v registru CTRL\_REG4\_A (případně CTRL\_REG4\_G pro gyroskop). Nastavení rozsahu je zobrazeno v tabulce Tabulka 4. K napájení odvodu postačí napájecí napětí v rozsahu 2,4 V až 3,6 V. Digitální vstupně výstupní část může být napájena napětím již od 1,8 V. Zvolené 3,3 V napájení tedy můžeme použít pro napájení digitální i analogové části a obvod bude schopen komunikovat se zvoleným mikrokontrolérem. (STMICROELECTRONICS, 2012)

Tabulka 4 – Nastavení rozsahu senzoru (STMICROELECTRONICS, 2012)

Bit FS1	Bit FS0	Rozsah akcelerometru[g]	Rozsah gyroskopu [°/s]
0	0	±2	±250
0	1	±4	±500
1	0	±8	±2000
1	1	±16	±2000

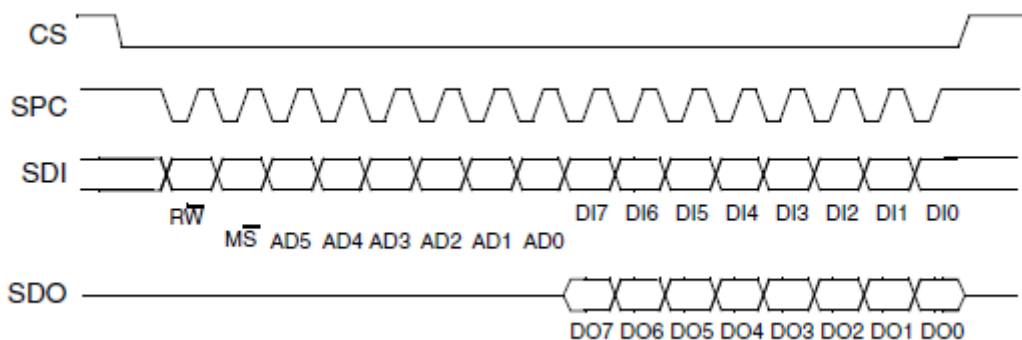
### 4.2.1 Parametry LSM330DLC

Zde je vypsáno několik základních parametrů součástky získaných z datasheetu uvedeného v seznamu použité literatury jako citace (STMICROELECTRONICS, 2012).

- analogové napájecí napětí od 2,4 V do 3,6 V
- digitální napájecí napětí I/O pinů od 1,8 V
- 3 nezávislé kanály akcelerometru, 3 nezávislé kanály gyroskopu
- ±2/±4/±8/±16 g volitelné dynamické rozsahy akcelerometru
- ±250/±500/±2000 °/s volitelné dynamické rozsahy gyroskopu
- šestnáctibitový převodník
- SPI/I2C sériové rozhraní
- programovatelné generátory přerušování volného pádu a detekce pohybů
- pracovní teplotní rozsah -40 °C až 85 °C
- pouzdro LGA 28L

#### 4.2.2 SPI komunikace

Při komunikaci mezi zařízeními je senzor v roli slave zařízení, proto je před začátkem každé komunikace aktivován senzor akcelerometru nebo gyroskopu pomocí shoení jejich CS pinu na hodnotu logické nuly. Komunikace je následně zahájena master zařízením, které připraví data pro pin SDI a začne je vysílat synchronizovaně se sestupnou hranou hodinového signálu na SPC pinu. Cyklus komunikace je rozděleno do dvou osmibitových částí. V první části určuje úvodní bit  $R\bar{W}$  na vstupu SDI, zda bude do senzoru zapisováno nebo z něj čteno. Následující bit  $M\bar{S}$  signalizuje zvolený mód přenosu. Při vícebajtovém módu je adresa registrů inkrementována a není ji tak nutné při přenosu dvou po sobě jdoucích registrů přenášet. Následující bity AD5-AD0 signalizuje adresu senzoru, na kterou nebo ze které bude zapisováno nebo čteno (například pro spodní bajt zrychlení v ose x tomu odpovídá adresa 28 v hexadecimální soustavě). Nyní je na řadě druhá osmibitová část, která je závislá na nastavení  $R\bar{W}$ . Pro zápis pokračuje komunikace daty na vstupu SDI, které budou uloženy do daného registru. Při čtení jsou přijímaná data senzorem ignorována a naopak odesílá obsah zvoleného registru na výstup SDO. Po ukončení tohoto přenosu je následně pin CS nastaven na logickou jedničku a přenos je ukončen. Nastavení interpretace dat je možné změnit bitem BLE v registrech CTRL\_REG4, který určuje, zda první přenášený datový bit je LSB či MSB. Dle standartního nastavení přenos začíná MSB. Pro komunikaci je možné využít nastavení přerušení data ready (data připravena) na některý výstupní pin přerušení senzoru, což usnadní řízení komunikace mikrokontrolérem (STMICROELECTRONICS, 2012). Průběhy signálu na jednotlivých pinech senzoru během komunikace je znázorněn na obrázku: Obrázek 28.



Obrázek 28 – Průběh SPI komunikace (STMICROELECTRONICS, 2012)



### 4.3 H-můstek

Pro řízení motorů je využit integrovaný obvod H-můstku L6201 vyráběný společností STMicroelectronics. Spínacím prvkem můstku je čtveřice DMOS tranzistorů. Rozsah napájecího napětí je doporučen od 12 do 48 V, ale zařízení začíná pracovat již od 9V. Proto pro napájení postačí jakýkoli dostupný akumulátor určený například pro RC modely. Vstupní logické úrovně jsou kompatibilní s logickými úrovněmi mikroprocesoru, kdy logická 0 můstku je od -0,3 do 0,8 V a logická 1 od 2 do 7 V. (STMICROELECTRONICS, 2003)

#### 4.3.1 Parametry L6201

Dále uvedené parametry jsou převzaty z datasheetu dané součástky uvedeného v seznamu použité literatury pod položkou (STMICROELECTRONICS, 2003).

- napájecí napětí od 12 do 48 V
- 2 A maximální špičkový proud
- celkový efektivní proud do 1 A
- TTL kompatibilní
- operační frekvence do 100 kHz
- interní napájení logiky
- teplotní pojistka na 150 °C
- vysoká účinnost
- pouzdra SO20, PowerSO20, POWERDIP, MULTIWATT11

### 4.4 Motory a kola

Jako pohon robota byly zvoleny stejnosměrné motory s komutátorem a převodovkou Pololu 1585 s převodovým poměrem 47:1, což zaručí dostatečný kompromis mezi maximální rychlostí a silou potřebnou ke stabilizaci. Fotografie motoru je na obrázku: Obrázek 29. Jejich hmotnost a rozměry jsou 88 g a 25x52 mm. Nominální hodnota napájení motoru je 6 V, ale mohou být spolehlivě využívány již v rozsahu 3 V až 9 V. Motor se může začít otáčet už při 1 V. Stejně tak je schopný vydržet i vyšší napětí. Obojí má ovšem negativní vliv na jeho životnost. Pro snadné upevnění byla zvolena kola Pololu 1420, která jsou určena pro montáž na 4 mm zploštělou hřídel použitou u zvoleného motoru. Fotografie těchto kol je na obrázku: Obrázek 30. Jedná se o plastová kola o průměru 60 mm potažená měkkými silikonovými pneumatikami, které zajistí kvalitní přilnavost například na linoleu. (POLOLU CORPORATION, 2001-2013)



[www.pololu.com](http://www.pololu.com)

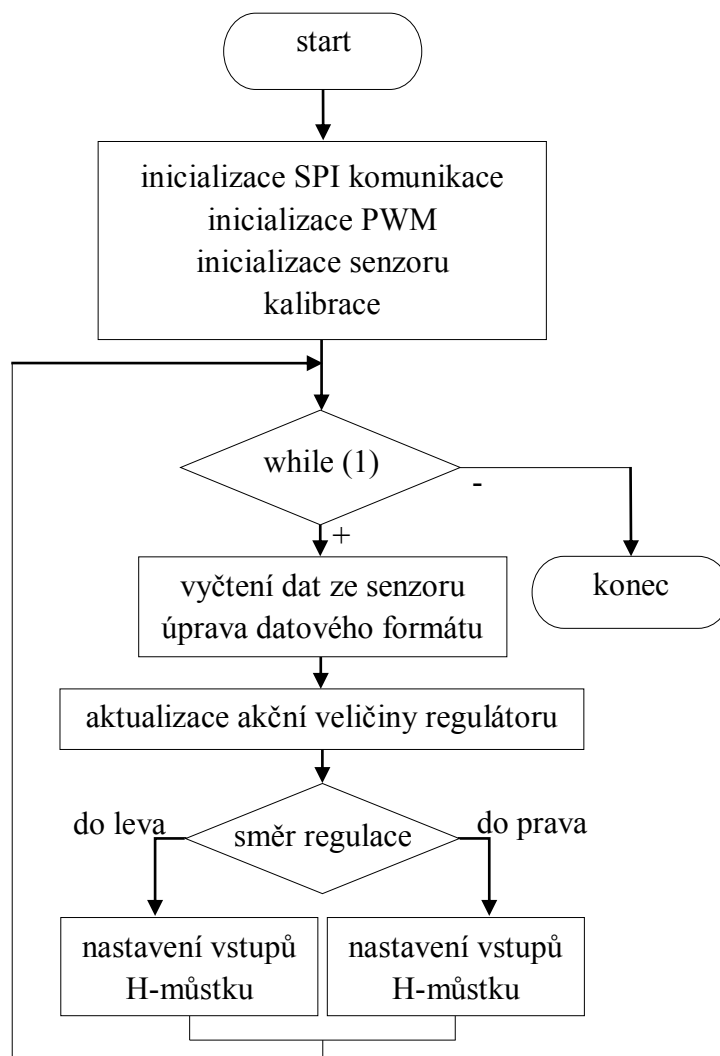
**Obrázek 29 – Motor Pololu 1585 (POLOLU CORPORATION, 2001-2013)**



**Obrázek 30 – Kola Pololu 1420 (POLOLU CORPORATION, 2001-2013)**

## 4.5 Řídicí program mikrokontroléru

Na počátku algoritmu pro řízení robota je nutné nastavit jednotlivé parametry mikrokontroléru a senzoru pro jejich správnou funkčnost, tak jak je popsáno ve výše zmíněných kapitolách praktické části práce. Následuje nekonečná smyčka, ve které je samotný program. Na počátku každého cyklu je získání dat ze senzoru a jejich následný přepočítání z dvojkového doplňku na formát se znaménkem a absolutní hodnotou. Následuje pak výpočet akční veličiny regulátoru. Na samotném konci cyklu je určení znaménka akční veličiny, které vyjadřuje směr otáčení motoru. Tento směr je pak nastaven na vstupní piny H-můstku a absolutní hodnota akční veličiny je nastavena jako komparační hodnota pro čítač/časovač. PWM výstup čítače a časovače pak ovládá enable pin H-můstku. Následně se celý cyklus neustále opakuje. Grafický rozbor programu je znázorněn na vývojovém diagramu Obrázek 31.



Obrázek 31 – Vývojový diagram

### 4.5.1 Hlavní smyčka programu

Základním prvkem celého programu je nekonečná smyčka, která následuje po inicializaci a nastavení potřebných funkcí mikrokontroléru. V této smyčce jsou použity dvě funkce. První z nich je funkce Zmer a druhou funkce NastavMotory. Během ladění a nastavení parametrů regulátoru bylo ještě navíc využito odeslání naměřených dat po sériové lince.

Zde je uveden zdrojový kód popisované části programu:

```
while(1)
{
    Zmer();
    NastavMotory();
    //sprintf(kposlani,"%d; %d; %d;
%d\n\r", (int)uhlovarychlost, (int)(uhela*100), (int)(uhelg*100), (int)(zasah));
    //PosliText(kposlani);
    _delay_ms(10);
}
```

### 4.5.2 Funkce NastavMotory

Na počátku této funkce je výpočet akční veličiny regulátoru (zásah). Ta je počítána z regulační odchylky a její derivace. Z níže uvedeného kódu je patrné, že ve skutečnosti není výpočet prováděn z regulační odchylky ale přímo z naměřených dat. Tato naměřená data jsou ovšem v tomto případě, kdy požadovaný výstup je roven nulovému úhlu, shodná s regulační odchylkou a její derivací. V druhé části funkce následuje rozhodnutí o směru a absolutní hodnoty zásahu motorů. Dle toho jsou následně nastaveny příslušné piny motorů určující směr a porovnávací registry obvodu čítače a časovače určující velikost zásahu obou motorů.

Zde je uveden zdrojový kód popisované části programu:

```
void NastavMotory()
{
    zasah = uhlovarychlost*D + ((uhela-chteny)*0.9+(uhelg-chteny)*0.1)*P;
    if (zasah>65535)
    {
        zasah=65535;
    }
    else if(zasah< (-65535))
    {
        zasah=-65535;
    }
    if(zasah>0)
    {
        PORTB|=(1<<PB0); //L+ do 1
        PORTD&=~(1<<PD7); //L- do 0
        PORTD|=(1<<PD6); //P+ do 1
        PORTD&=~(1<<PD5); //P- do 0
        OCR1A=(int)zasah; // uroven PWM
        OCR1B=(int)zasah; // uroven PWM
    }
}
```

```

}
else if(zasah<0)
{
    zasah=-zasah;// pouze kladne hodnoty v OCR
    PORTD|=(1<<PD7);//L- do 1
    PORTB&=~(1<<PB0);//L+ do 0
    PORTD|=(1<<PD5);//P- do 1
    PORTD&=~(1<<PD6);//P+ do 0
    OCR1A=(int)zasah;// uroven PWM
    OCR1B=(int)zasah;// uroven PWM
}
else
{
    PORTB&=~(1<<PB0);//L+ do 0
    PORTD&=~(1<<PD7);//L- do 0
    PORTD&=~(1<<PD6);//P+ do 0
    PORTD&=~(1<<PD5);//P- do 0
    OCR1A=0;// uroven PWM do 0
    OCR1B=0;// uroven PWM do 0
    PORTB&=~((1<<PB1)|(1<<PB2));
}
}

```

## Závěr

V několika kapitolách byl přiblížen a rozebrán způsob měření vychýlení robota a popis jednotlivých senzorů, použitelných právě pro takováto měření. Jednalo se především o různé druhy akcelerometrů a gyroskopů.

V teoretické části jsou postupně shrnuty veškeré teoretické znalosti a poznatky týkající se zadané problematiky potřebné pro následnou praktickou část. V práci bylo popsáno několik základních a cenově dostupnějších senzorů a ostatních součástí, které ovšem plně postačí k základnímu přehledu problematiky a správné funkci finálního výrobku.

K praktické demonstraci robota byly pak použity senzory kapacitního MEMS akcelerometru a vibračního MEMS gyroskopu integrované do společného pouzdra součástky. Toto výrazně přispělo ke zmenšení rozměrů výrobku. Pro řízení robota byl použit levný dostupný osmibitový mikrokontrolér AVR ATmega 48, který disponuje všemi potřebnými hardwarovými prvky. Pro pohon byly zařazeny dostupné stejnosměrné motory s převodovkou výrobce Pololu. Na jejich spínání byl využit běžný H-můstek. Konkrétně byl zvolen obvod L6201.

Princip funkce celého robota je výše rozkreslen na vývojovém diagramu v kapitole Řídící program mikrokontroléru. Základní vlastností výrobku ovlivňující kvalitu jeho stability je správné nastavení požadovaného úhlu pomocí kalibrace. Kalibrace je provedena jednoduše tak, že po spuštění přístroje je nutné udržovat robota pokud možno co nejpřesněji v okolí rovnovážné polohy po dobu několika sekund. Během této doby je měřen a následně zprůměrován úhel odklonu a posléze nastaven jako požadovaný.

Během práce se vyskytlo několik drobnějších potíží, především praktického rázu. Jednou z nich bylo obtížné pájení integrovaného obvodu senzoru právě pro jeho miniaturní rozměry a to především proto, aby při procesu pájení nedocházelo k jeho přílišnému ohřevu a následnému zničení. Druhým nepatrně neočekávaným, ale za to snadněji odstranitelným problémem, byl šum akcelerometru, který nešlo pro konstrukci samostatně nestabilního robota zanedbat. Pro jeho odstranění jsem zvolil možnost využití průměrné hodnoty několika po sobě jdoucích vzorků na místo častější, ale o to nespojitější aktualizaci naměřené veličiny. Důležité bylo zvolit vhodný kompromis mezi kvalitou průměrné hodnoty a již zmíněnou dobou mezi aktualizací naměřených dat, protože reálná změna náklonu dosahuje určitých rychlostí a je potřebné její průběh postihnout s dostatečným krokováním.

Na úplný závěr bych zmínil několik možných doplnění, kterými by bylo možné do budoucna vylepšit výrobek. Asi jako základní vylepšení bych navrhl zařazení nějaké bezdrátové komunikace, pomocí níž by bylo možné ovládat robota a pohybovat se s ním v celém 2D prostoru. S tímto vylepšením úzce souvisí i nový návrh způsobu regulace ve stavech, kdy robot zatačí a nalezení vhodného požadovaného úhlu, při kterém by robot

vykonával pohyb před či vzad. Řídící deska je doplněna o konektory pro připojení přes I2C a sériové rozhraní pro případné rozšíření. Sériové rozhraní bylo s výhodou využito při ladění aplikace.

## Literatura

**ATMEL CORPORATION. 2011.** Datasheet ATmega48/88/168. *Atmel Corporation: Microcontrollers, 32-bit, and touch solutions.* [Online] 05 2011. [Citace: 30. 03 2013.] <http://www.atmel.com/Images/doc2545.pdf> .

**DIGI-KEY, CORPORATION. 1995-2013.** Liquid Level Sensing is Key Technology for Today's Systems – Part 1. *DigiKey Electronics: Electronic Components Distributor.* [Online] 1995-2013. [Citace: 11. 03 2013.] <http://www.digikey.com/us/en/techzone/sensors/resources/articles/liquid-level-sensing.html>.

**FRADEN, Jacob. 2004.** *Handbook of modern sensors: physics, designs, and applications.* 3rd ed. New York : Springer-Verlag, 2004. 03-870-0750-4.

**HAVRLANT, Lukáš. 2006-2013.** *Matematika Polopatě: pro základní, střední a vysoké školy.* [Online] 2006-2013. [Citace: 10. 03 2013.] <http://www.matweb.cz/>.

**ING. ŠIMON, Josef. 2011.** BLDC aneb DC motor s nulovými náklady na údržbu. *Elektro: odborný časopis pro elektrotechniku.* [Online] FCC PUBLIC s. r. o., 2011. [Citace: 21. 03 2013.] [http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=44507](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=44507). ISSN 1210-0889.

**MRK s.r.o. -2013.** PID regulácia. *Meracia a regulačná technika: vývoj software a hardware.* [Online] -2013. [Citace: 23. 03 2013.] <http://mrk.eu/sk/pid-regulacia/>.

**NOVÁK, Petr. 2005.** *Mobilní roboty: pohony, senzory, řízení.* Vyd. 1. Praha : BEN - technická literatura, 2005. str. 247 s. ISBN 80-730-0141-1.

**POLOLU CORPORATION. 2001-2013.** *Pololu: Robotics and Electronics.* [Online] 2001-2013. [Citace: 03. 05 2013.] <http://www.pololu.com/> .

**REICHL, Jaroslav. 2006-2013.** Pohyb hmotného bodu po kružnici. *Encyklopedie fyziky.* [Online] 2006-2013. [Citace: 17. 03 2013.] <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/15-pohyb-hmotneho-bodu-po-kruznici> .

**SEIDEL, Hans-Hermann. 2013.** Frequently asked questions to slope. *SEIKA Mikrosystemtechnik GmbH.* [Online] 2013. [Citace: 11. 03 2013.] [http://www.seika.de/english/html\\_e/FAQ\\_e.htm](http://www.seika.de/english/html_e/FAQ_e.htm).

**STMICROELECTRONICS. 2003.** Datasheet L6201. *STMicroelectronics.* [Online] 07 2003. [Citace: 23. 04 2013.] <http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/datasheet/CD00000089.pdf>.



**STMICROELECTRONICS. 2012.** Datasheet LSM330DLC. *STMicroelectronics*. [Online] 17. 10 2012. [Citace: 01. 04 2013.] <http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/datasheet/DM00037200.pdf>.

**ŠULC, Bohumil a Miluše, VÍTEČKOVÁ. 2004.** *Teorie a praxe návrhu regulačních obvodů*. Praha : Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-010-3007-5.

**THE OPEN UNIVERSITY. 2013.** Engineering: the nature of problems. *OpenLearn: LabSpace*. [Online] 2013. [Citace: 16. 03 2013.] Dostupné z: <http://labspace.open.ac.uk/mod/resource/view.php?id=420014#>.

**VOJÁČEK, Antonín. 2009.** Integrované MEMS GYROSKOPY. *HW.cz: Vše o elektronice a programován*. [Online] 11. 10 2009. [Citace: 18. 03 2013.] <http://automatizace.hw.cz/integrované-mems-gyroskopy> .

**VOJÁČEK, Antonín. 2007.** Jak pracují nové 3D MEMS akcelerometry Freescale ? *HW.cz: Vše o elektronice a programování*. [Online] 30. 04 2007. [Citace: 16. 03 2013.] <http://www.hw.cz/soucastky/jak-pracuji-nove-3d-mems-akcelerometry-freescale.html>.

**Wikimedia Foundation. 2007.** File:Motor DC 2Pole.png. *Wikipedia: the free encyclopedia*. [Online] 30. 12 2007. [Citace: 19. 03 2013.] [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/49/Motor\\_DC\\_2Pole.png](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/49/Motor_DC_2Pole.png).

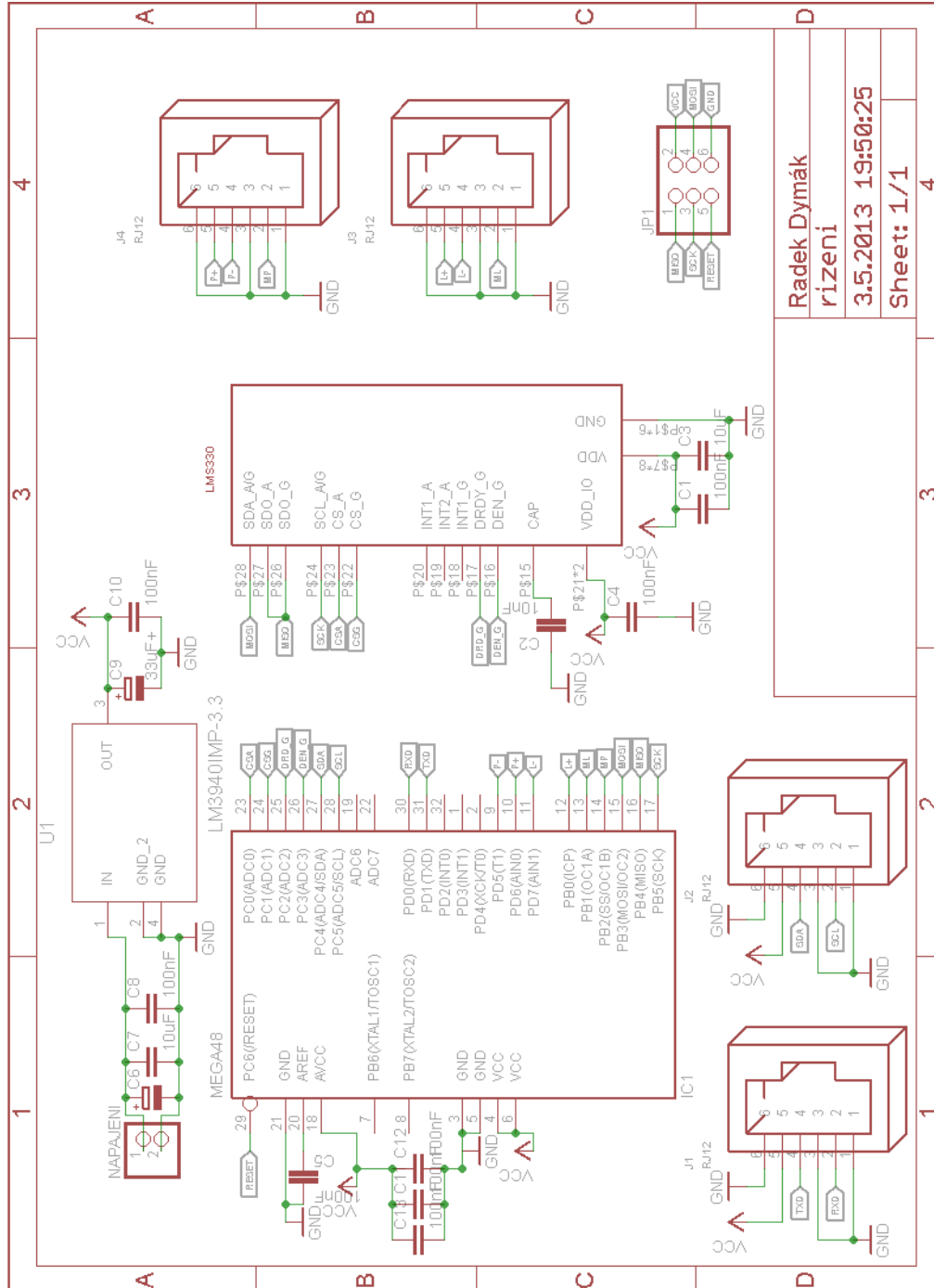
**Wikimedia Foundation. 2013.** PID controller. *Wikipedia: the free encyclopedia*. [Online] 19. 03 2013. [Citace: 23. 03 2013.] [http://en.wikipedia.org/wiki/PID\\_controller](http://en.wikipedia.org/wiki/PID_controller).

**ZEMĚPIS.COM. 2002-2011.** *ZEMĚPIS: informace o České republice a celém světě*. [Online] 2002-2011. [Citace: 19. 03 2013.] <http://www.zemepis.com/> .

## Příloha A – Obsah CD

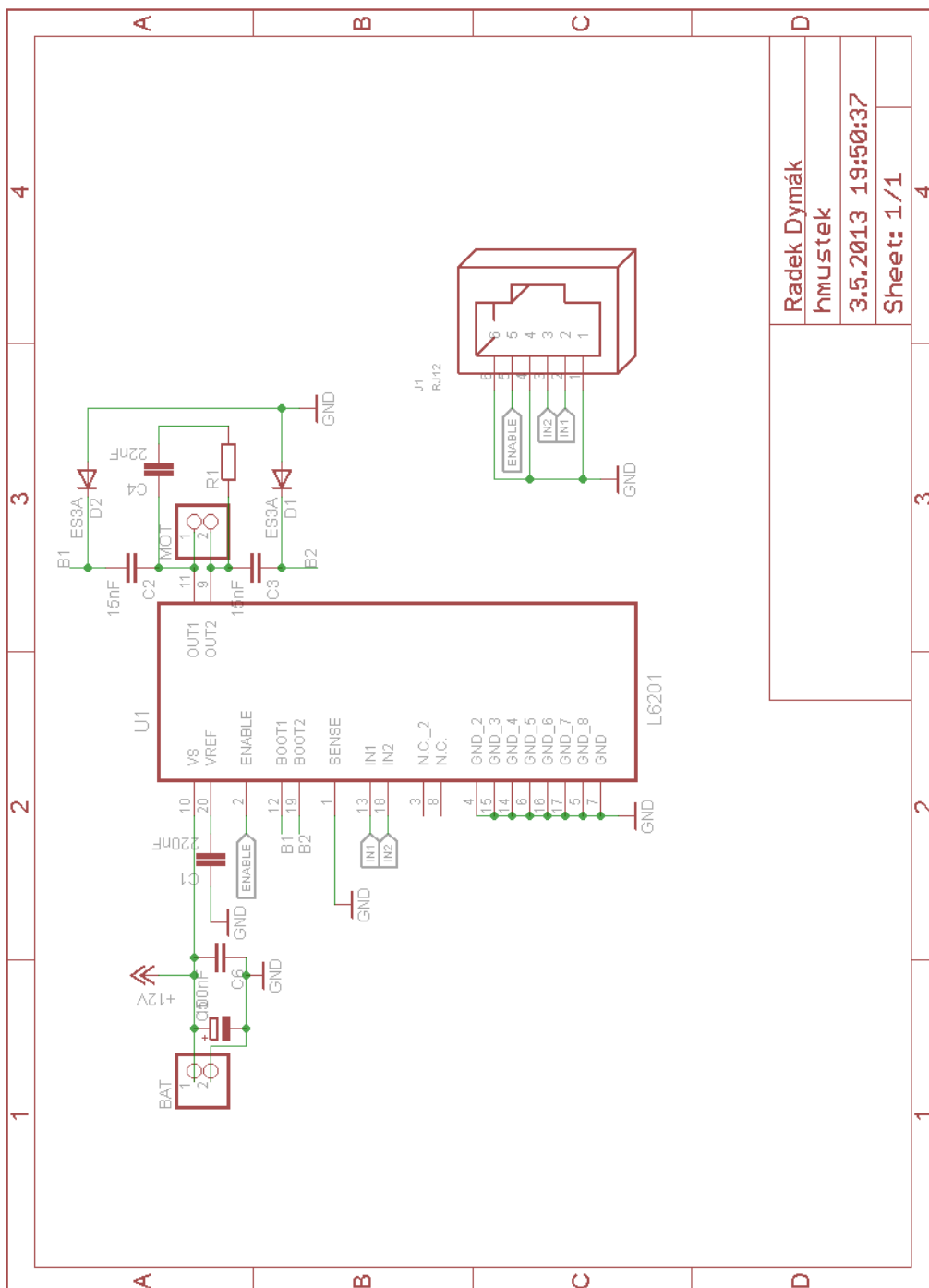
- Text práce: DymakR\_Balancujicirobot\_PR\_2013.pdf
- Adresář Návrh Eagle:
  - Schéma řídicí části: rizeni.sch
  - DPS řídicí části: rizeni.brd
  - Schéma obvodu H-můstku: hmustek.sch
  - DPS obvodu H-můstku: hmustek.brd
- Adresář Software:
  - Zdrojový kód v C: Balancujicirobot.c
  - Přeložený strojový kód pro mikrokontrolér: Balancujicirobot.hex

## Příloha B – Schéma řídicí části



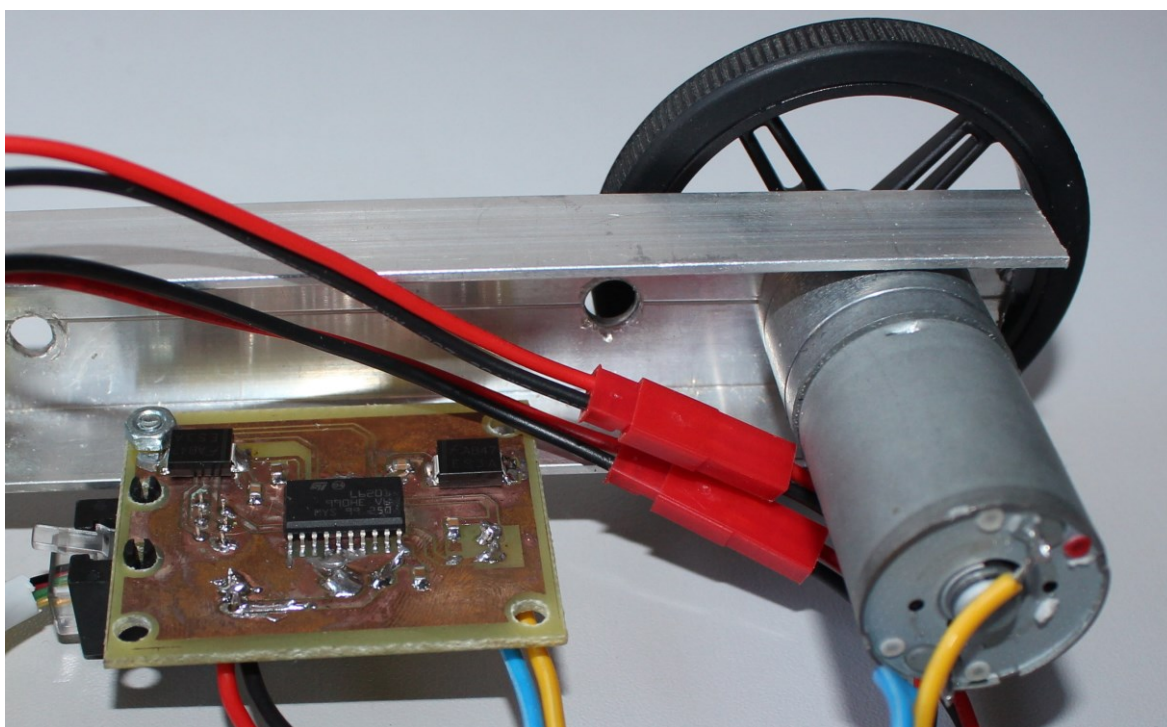
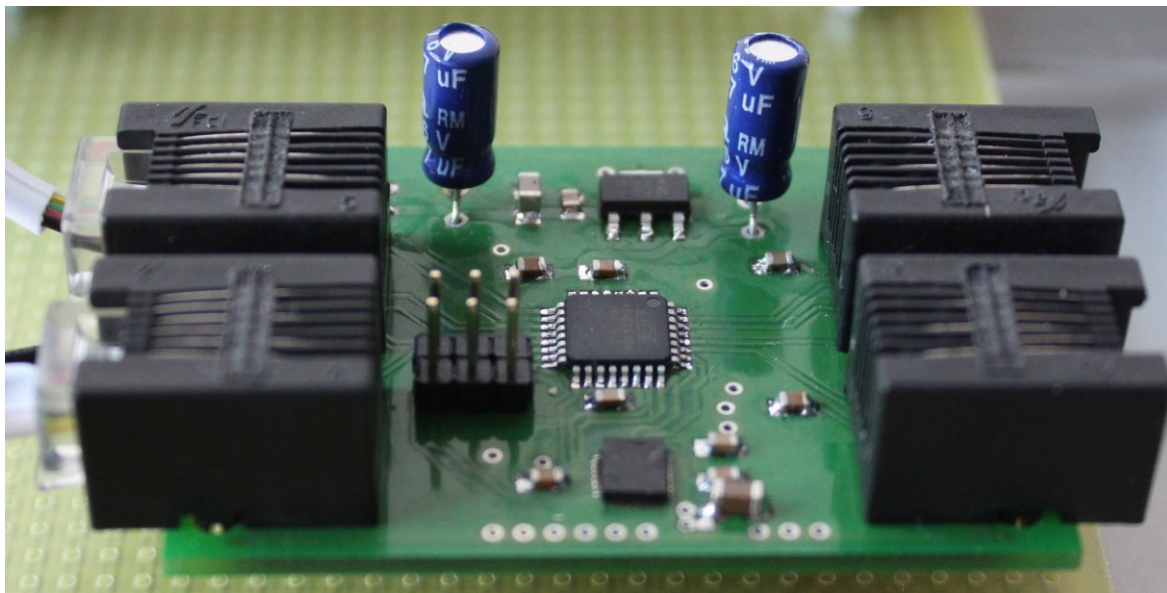
Radek Dymák  
řízení  
3.5.2013 19:50:25  
Sheet: 1/1

# Příloha C – Schéma obvodu H-můstku



Radek Dymák  
 hmustek  
 3.5.2013 19:50:37  
 Sheet: 1/1

## Příloha D – Fotografie řídicí části a obvodu H-můstku s motorem



## Příloha E – Fotografie robota v činnosti

