

Dvoukolový nestabilní robot

A Two-Wheeled Balancing Robot

Bc. Jindřich Vavřík

Diplomová práce
2013



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky
akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jindřich Vavřík**
Osobní číslo: **A11428**
Studijní program: **N3902 Inženýrská informatika**
Studijní obor: **Automatické řízení a informatika**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Dvoukolový nestabilní robot**

Zásady pro vypracování:

1. Popište existující konstrukce dvoukolových nestabilních robotů.
2. Vytvořte model dvoukolového robota, včetně řídicích obvodů s mikropočítačem.
3. Navrhněte a realizujte propojení robota s počítačem.
4. Navrhněte a ověřte řízení robota s možností parametrizace z počítače.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1. **NOVÁK, Petr**, Mobilní roboty – pohony, senzory, řízení, Praha: BEN – technická literatura, 2005. ISBN/EAN 80-7300-141-1 / 9788073001414.
2. **MANN, Burkhard**. C pro mikrokontroléry: ANSI-C, kompilátory C, spojovací programy – linkery, práce s ATMELE AVR a MSC-51, příklady programování v jazyce C, nástroje pro programování, tipy a triky. Praha: BEN, 2003. ISBN 80-730-0077-6.
3. **PINKER, Jiří**. Mikroprocesory a mikropočítače. Praha: BEN – technická literatura, 2004. ISBN 80-730-0110-1.
4. **ŠOLC, František a Luděk ŽALUD**. Robotika, Brno, VUE FEKT, 2002.
5. **ÚŘEDNÍČEK, Zdeněk**. Robotika [online]. Zlín: Univerzita Tomáše Bati, 2012 [cit. 2013-01-23]. ISBN 978-80-7454-223-7. Dostupné z: <http://dspace.k.utb.cz/>
6. **NAVRÁTIL, Pavel**. Automatizace: vybrané statě. Vyd. 1. Ve Zlíně: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2011, 289 s. ISBN 978-80-7318-935-8.
7. **DOSTÁL, Petr a Radek MATUŠŮ**. Stavová a algebraická teorie řízení. Vyd. 1. Ve Zlíně: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2010, 90 s. ISBN 978-80-7318-991-4.

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Jan Dolinay, Ph.D.

Ústav automatizace a řídicí techniky

Datum zadání diplomové práce:

24. února 2013

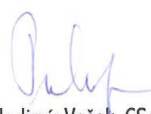
Termín odevzdání diplomové práce:

11. června 2013

Ve Zlíně dne 24. února 2013


prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
děkan




prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
ředitel ústavu

ABSTRAKT

Práce se zabývá vytvořením modelu dvoukolového robota. Stabilita a pohyb robota je zajištěna elektronikou s mikrokontrolerem, senzory pohybu a budiči krokových motorů, jež slouží jako akční členy. Robot je ovládán za pomoci PC aplikace umožňující real-time sledování průběhů veličin uzavřeného regulačního obvodu robota, nastavení parametrů regulačního algoritmu a ovládání robota. Parametry regulačního algoritmu jsou vypočteny na základě identifikace dynamiky modelu robota. Model je vytvořen pro výukové účely předmětů Automatické řízení a Identifikace systémů.

Klíčová slova: robot, mikrokontroler, ARM, gyroskop, akcelerometr, krokový motor

ABSTRACT

This thesis deals with creating model of two-wheeled balancing robot. Stability and movement of the robot is provided by electronic control system with microcontroller, motion sensors and stepper motor drivers that produces the robot movement. The robot is controlled by a PC application that allows monitoring the progress variables of the closed control loop, control algorithm parameters and controls the robot in real-time. Parameters of the control algorithm are calculated based on the identification of the dynamics model. The model is designed for educational purposes, to be used in courses of Automatic Control and System Identification.

Keywords: robot, microcontroller, ARM, gyroscope, accelerometer, stepper motor

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Jan Dolinay, Ph.D za jeho odborné rady a vedení v průběhu práce.

Děkuji také rodině a svým blízkým za podporu po celou dobu studia.

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně

.....
podpis diplomanta

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 STÁVAJÍCÍ KONSTRUKCE DVOUKLOVÝCH NESTABILNÍCH ROBOTŮ	11
1.1 SEGWAY	11
1.2 BALANDUINO	12
1.3 NBOT.....	13
2 MIKROKONTROLER ARM	15
3 MĚŘENÍ NÁKLONU	16
3.1 KONTAKTNÍ MĚŘENÍ.....	16
3.2 BEZKONTAKTNÍ MĚŘENÍ.....	16
3.2.1 Inklinometr	17
3.2.2 Akcelerometr.....	17
3.2.3 Gyroskop	18
4 KROKOVÝ MOTOR	20
4.1 CELO-KROK.....	20
4.2 MICROSTEPPING	21
5 IDENTIFIKACE SYSTÉMU	22
5.1 ANALYTICKÝ ZPŮSOB.....	22
5.2 EXPERIMENTÁLNÍ ZPŮSOB	22
5.2.1 Deterministické metody	23
5.2.2 Stochastické metody.....	24
5.2.2.1 Metoda nejmenších čtverců	24
6 REGULACE SYSTÉMU	26
6.1 KONVENČNÍ METODY SYNTÉZY	26
6.2 POLYNOMIÁLNÍ METODY SYNTÉZY.....	26
6.2.1 Návrh regulátoru 1DOF konfigurace systému řízení polynomiální metodou.....	27
II PRAKTICKÁ ČÁST	29
7 POPIS MODELU	30
8 HARDWARE	32
8.1 MIKROKONTROLER	33
8.2 AKCELEROMETR.....	35
8.3 GYROSKOP	36
8.4 H-MŮSTEK L6205	37
8.5 BLUETOOTH MODUL.....	39
8.6 NAPÁJENÍ.....	40
8.7 VÝROBA DPS.....	40
9 SOFTWARE	42

9.1	POPIS PROGRAMU MIKROKOTROLERU.....	42
9.2	POPIS PROGRAMU BALANCINGROBOT	43
9.3	VÝSTUPNÍ SOUBOR PROGRAMU BALANCINGROBOT	43
9.4	KOMUNIKACE MODELU A PC.....	44
9.4.1	Přenos dat ROBOT→ PC.....	45
9.4.2	Přenos dat PC→ ROBOT.....	46
10	MĚŘENÍ NÁKLONU	47
10.1	GYROSKOP	47
10.2	AKCELEROMETR.....	48
10.3	RUŠENÍ OVLIVŇUJÍCÍ SPRÁVNÉ MĚŘENÍ NÁKLONU.....	49
10.4	KOMBINACE GYROSKOP A AKCELEROMETR.....	49
11	IDENTIFIKACE A REGULACE SYSTÉMU	50
11.1	IDENTIFIKACE SYSTÉMU	50
11.2	REGULAČNÍ ALGORITMUS	52
11.3	NÁVRH REGULÁTORU	52
11.4	PRÁCE S MODELEM.....	55
12	VÝVOJOVÉ PROSTŘEDKY	57
12.1	NÁVRH ELEKTRONIKY MODELU.....	57
12.2	NÁVRH KONSTRUKCE	58
12.3	PROGRAMOVÁNÍ MIKROKONTROLERU	58
12.4	PROGRAMOVÁNÍ OBSLUŽNÉHO PROGRAMU BALANCINGROBOT	60
	ZÁVĚR	61
	ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ.....	62
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	63
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	65
	SEZNAM OBRÁZKŮ	67
	SEZNAM TABULEK.....	68
	SEZNAM PŘÍLOH.....	69

ÚVOD

Celé studium na vysoké škole se skládá z opakovaného procesu získávání teoretických znalostí a jejich následného procvičování v seminářích a laboratořích. V laboratořích se pak nalézají pomůcky, které jsou nejrůznějšího charakteru a zaměření, avšak všechny mají stejný účel. Účelem je ukázat uživateli, dále jen studentovi, jak je možné nabyté znalosti uplatnit a čeho lze jejich využitím docílit. Získané teoretické schopnosti je pak možno propojit si s konkrétní aplikací a lépe danou problematiku pochopit. Podmínkou, aby byla studentovi práce s laboratorní pomůckou ku prospěchu, je, aby práce s ní byla co možná nejjednodušší ale hlavně, aby byla co nejvíce zajímavá. V případě, že jsou tyto podmínky splněny, je účel laboratorní pomůcky splněn s nejvyšší efektivností.

Jednoduchost a snaha o zaujetí byly dva pilíře při vzniku myšlenky na sestavení laboratorní výukové pomůcky v podobě balancujícího dvoukolového robota. Tato aplikace je poměrně zajímavá a má i své praktické využití, v podobě, dnes již velmi rozšířeného, vozítka Segway. Jednoduchost použití laboratorní úlohy je hledána v aplikaci přehledného ovládacího programu v podobě okénkové aplikace na PC, ve které student nalezne všechny potřebné informace o chodu laboratorní pomůcky a výstupní data potřebná pro využití v předmětech zabývajících se identifikací systému a návrhu parametrů regulátoru.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 STÁVAJÍCÍ KONSTRUKCE DVOUKLOVÝCH NESTABILNÍCH ROBOTŮ

Nestabilní dvoukolový robot, někdy také označován jako balanční robot je poměrně rozšířenou aplikací realizovanou v mnoha provedeních. Základem je konstrukce, kterou lze specifikovat tím, že její požadovaná poloha v prostoru není stabilní polohou robota. Není stabilní v důsledku toho, že v této požadované poloze je těžiště robota nad osou otáčení jeho kol. Požadované polohy je pak dosaženo aplikací systému, který dokáže robota v požadované poloze udržet.

Konstrukce robotů tohoto typu je vždy stejná, podvozek tvoří dvojice kol, poháněných buďto dvěma nezávisle řízenými motory nebo jedním motorem spojujícím obě kola. Nejčastěji jsou používány DC motory s převodovým mechanismem, jejich parametry pak závisí na typu aplikace. Motory jsou spojeny s tělem robota, jež nese baterie a systémy potřebné pro zajištění stability. Senzorika je nejčastěji prováděna elektronickými součástkami typu akcelerometr, gyroskop nebo inklinometr. Výkonová elektronika pro řízení motorů závisí na typu motorů.

Algoritmus stabilizačního systému, případně informace o dynamikách modelů autoři nalezených řešení nezveřejňují. Dále je tedy shrnuta převážně konstrukce dvoukolových robotů.

1.1 Segway

Zřejmě nejznámějším dvoukolovým nestabilním robotem je vozítko Segway. Jedná se o zajímavý dopravní prostředek těšící se v současné době velkého zájmu. Vozítko má své kořeny v USA, kde jej v roce 2001 začala vyrábět stejnojmenná firma. Segway je určen pro přepravu jedné osoby, která vozítko ovládá pomocí ovládacího panelu. Stranovým náklonem ovládacího panelu ovlivňuje jezdec směr jízdy. Velikostí náklonu dopředu/dozadu pak rychlost jízdy. Rychlost v dnešní době vyráběných vozítek je okolo 20km/h. Motory jsou zde použity dva o síle 2HP. Senzorika vozítka je podle dostupných informací založena na dvojici nezávislých gyroskopických senzorů.

Segway představuje nejpraktičtější využití dvoukolových nestabilních robotů. Na trhu lze v dnešní době nalézt několik variant vozítka do různých prostředí a pro různá využití. Cena vozítka na českém trhu začíná na 200 000kč.

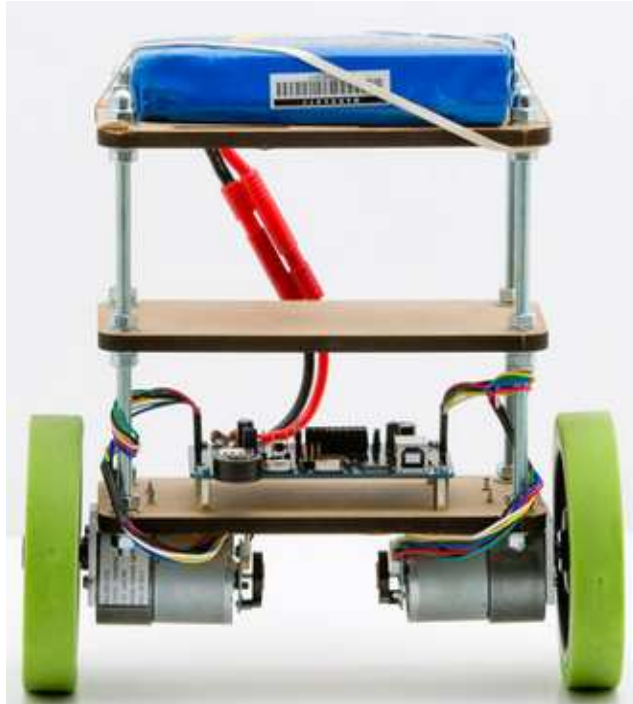


Obr. 1 – Segway. [1]

1.2 Balanduino

Balanduino je open-source projekt kompatibilní s Arduino platformou. Konstrukce je vytvořena třemi poschodími, jak je zobrazeno na obrázku (Obr. 2). Ve spodním poschodí je umístěna řídicí elektronika, jež integruje všechny potřebné elektronické komponenty, včetně mikrokontroleru ATmega. Senzorika robota je dvojího typu. Robot měří velikost náklonu pomocí gyroskopu a akcelerometru a měří také svou relativní polohu v prostoru pomocí rotačních enkodérů umístěných na dvojici DC motorů, které jsou využity pro pohyb robota. Prostřední patro je podle autorů vyhrazeno pro možná rozšíření o doplňkovou senzoriku, případně pro kamerový systém atd. Horní patro je vyhrazeno Li-pol baterii. Ovládání robota je realizováno ovladači pro herní konzole případně pomocí aplikace na mobilní telefon.

Autoři neuvádějí konkrétní účel robota, je však dodáván jako stavebnice a celý je koncipován jako open-source. Je tedy očekáváno určité rozšíření znalostí uživatele v oblasti mechaniky, elektroniky a programování. Cena tohoto robota je vyčíslena na 6000kč.



Obr. 2 – Balanduino. [2]

1.3 nBOT

Robot nBOT má velmi dlouhou historii datující se již od roku 2003. Autor robota vyvíjí dodnes. První verze robota byla tříkolová, označovaná jako nBOT v1. Úkolem tohoto robota bylo udržet cca. 1 metr vysokou tyč ve svislé poloze. Tohoto bylo dosaženo umístěním rotačního enkodéru do volně se otáčející osy tyče. Robot byl pak schopen svým pohybem vpřed/vzad s tyčí balancovat jako s inverzním kyvadlem. Verze druhá tohoto robota, byla již dvoukolová, byla odstraněna tyč a úkolem robota bylo balancovat se sebou samým. Sensorika náklonu byla prováděna pomocí jazýčku uchyceného ve spodní části robota, jež se svým koncem dotýká podložky. Tento typ měření náklonu je označován jako kontaktní a je popsán v kapitole 3.1 Kontaktní měření. Verze tři byla vybavena bezkontaktním měřením pomocí gyroskopu a akcelerometru. Tímto byly odstraněny nevýhody vyplývající z kontaktního měření. Současná verze robota nBOT v4 se od předešlých liší pouze novými DC motory s rotačními enkodéry pro měření relativní polohy robota v prostoru.

Autor robota neuvádí jeho cenu a není určen ani k prodeji.



Obr. 3 – nBOT Rev.4. [3]

Robot je konstrukčně mohutnější, dimenzovaný i do venkovního prostředí. Pohon je od začátku projektu realizován DC motory s integrovanou převodovkou. Nevýhodou DC motorů je jejich opotřebovávání a mechanická složitost. Mechanická složitost je patrná také u převodovek, které je nutno při nasazení DC motorů využít. Mechanické opotřebení a složitost, při které stoupá pravděpodobnost poruchy, pak může robota časem omezovat. Podvozek robota nBOT je zachycen na obrázku níže (Obr. 4). Na obrázku je dvojice DC motorů, spojených s převodovkami, jejichž výstupem je ozubené kolo, které je ještě dále s převodováním se hřídelí upevňující kola. Celá tato mechanika je upevněna v podvozkovém dílu.



Obr. 4 – Podvozek robota nBOT. [3]

2 MIKROKONTROLER ARM

ARM je architektura procesorů vyvinutá v Británii firmou ARM Limited. Starší obchodní název architektury ARM je Advanced RISC Machine, původní název je Acorn RISC Machine. Architektura tohoto typu nebyla do té doby rozšířená a způsobila v několika směrech revoluci v informačních technologiích a elektronice. První ARM mikroprocesory byly vytvořeny na bázi GaAs polovodičů. Tento materiál umožňoval na tehdejší dobu velmi vysokou taktovací frekvenci. Její návrh se řídil filosofií RISC. Unikátní byly mikroprocesory ARM také v délce bitového slova. Ta byla u mikrokontrolerů ARM 32bitová. První mikroprocesor s architekturou ARM byl navržen firmou ARM Limited v roce 1984. Architektura ARM byla v roce 2007 zastoupena v 98% z jedné miliardy každoročně prodaných mobilních telefonů. [4]

Firma ARM Limited již odstoupila od výroby procesorů. V současné době se firma zabývá jen vývojem. Licence na výrobu vyvinutých mikroprocesorů pak prodává společně s výrobou polovodičových součástek, jako jsou STMicroelectronics, Texas Instrument, Freescale atd. Výrobou mikroprocesorů s tímto jádrem se zabývají desítky firem. Schéma mikroprocesorů ARM je intelektuálním vlastnictvím firmy ARM Limited, která od těchto výrobců vybírá licenční poplatky. Procesory ARM je dnes možné nalézt ve všech odvětvích spotřební elektroniky od PDA, mobilních telefonů, multimediálních přehrávačů, přenosných herních konzolí, kalkulaček, až po počítačové periferie (pevné disky, routery). [4]

Architektura ARM se výrazně uplatňuje v embedded systémech v podobě mikrokontrolerů. Nízká spotřeba energie, vysoká odolnost, vysoký výpočetní výkon, množství periférií mikrokontroleru, rozšíření na trhu, technická podpora výrobců a jednoduchost použití jsou důvody velmi rozšířeného využití.

3 MĚŘENÍ NÁKLONU

Nezbytnou součástí aplikace je měření náklonu od vektoru gravitační síly (od kolmice k vodorovné podložce). K tomuto měření lze využít několika principů a na trhu nalézt řadu elektronických součástek. Každý princip má své výhody a nevýhody, své světlé a stinné stránky, které má za cíl shrnout tato kapitola.

3.1 Kontaktní měření

Nejjednodušším principem je měření využívající kontakt s podložkou. Tento princip vyžaduje použití senzoru umožňujícího měření polohy hřídele umístěné v pouzdře senzoru, na níž je připevněn „jazýček“, který se svým koncem dotýká podložky. Princip poté spočívá v měření změny polohy hřídele vůči svému pouzdru v důsledku změny náklonu aplikace. Měřícím senzorem může být v nejjednodušším případě potenciometr, u něhož se ve výsledku měří úbytek napětí mezi jezdcem připevněným na hřídeli a kontaktem vymezujícím prostor odporové vrstvy potenciometru. Mezi preciznější způsoby měření polohy hřídele jazýčku patří inkrementální, případně absolutní rotační snímače polohy, ať už založené na magnetickém nebo optickém principu.

Metoda vyčnívá svou jednoduchostí ale daní za jednoduchost je bezesporu interakce měřícího jazýčku s podložkou. Ta, ať už více, či méně ovlivňuje nestabilitu aplikace. V nejhorším případě se takovýto jazýček, původně sloužící k měření náklonu, může stát podpěrným bodem v tu chvíli již nebalancujícího robota.

3.2 Bezkontaktní měření

Bezkontaktní měření náklonu je založeno na měření vnějších sil působících na senzor. Nedochozí zde k interakci s podložkou, díky čemuž není měření zkreslováno jako v případě kontaktního principu měření. Bezkontaktní metody měření náklonu jsou svým principem jednoduché avšak elektronické součástky, které dané principy využívají pro měření své polohy v prostoru, jsou nepoměrně složitější. Tyto součástky se nazývají anglickou zkratkou MEMS (Micro Electro Mechanical System). Jedná se o měřící systém integrující mechanické prvky umožňující transformaci fyzikální veličiny – v tomto případě síly na veličinu elektrickou, která je měřena a dále zpracovávána. Vše na jednom křemíkovém základu. MEMS pohybové senzory se vyznačují svými rozměry, kupříkladu akcelerometr od firmy Freescale s označením MMA8452 je umístěn v pouzdře o rozměrech 3x3x1mm.

3.2.1 Inklinometr

Inklinometr je zařízení využívající gravitační síly země, která působí na volně zavěšenou strelku. Strelka pak ukazuje směr působení gravitační síly a tím svislou polohu. Natočení měřicího zařízení vůči takto získané svislé poloze pak určuje náklon měřicího zařízení. Jedná se o relativně jednoduchý princip, který se hojně využívá především v lavinové problematice k měření sklonu svahu. Na trhu se součástek schopných měřit náklon tímto principem nalézá velmi málo. Cena takovéto součástky se pohybuje v řádu tisícikorun.

3.2.2 Akcelerometr

Akcelerometr měří sílu působící na tělo senzoru díky tříelektrodovému kondenzátoru s pohyblivou středovou elektrodou. Její poloha (vzdálenost od krajních elektrod) se v důsledku působení síly odklání od rovnovážné – středové polohy a díky tomu dochází k diferenci kapacity mezi dvojicemi elektrod podle vzorce (1). Naměřená kapacita C je následně integrovanou elektronikou senzoru převedena na napětí.

$$C = \varepsilon \cdot \frac{S}{l} \quad [F] \quad (1)$$

kde ε je permitivita dielektrika $\left[\frac{F}{m} \right]$,

S vzájemná plocha elektrod $[m^2]$,

l vzdálenost elektrod.

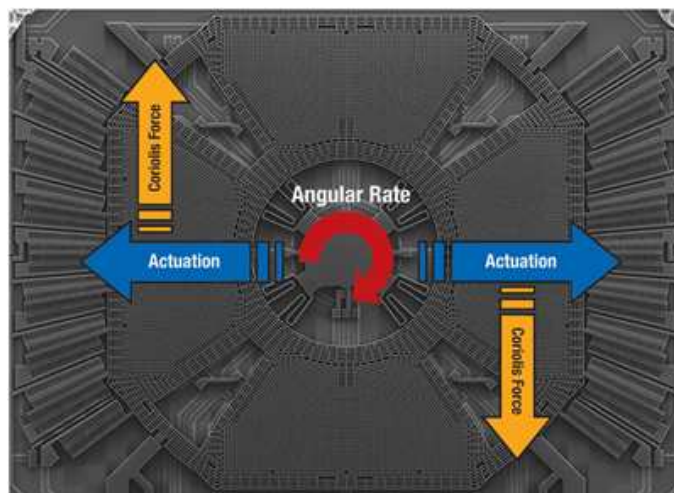
Senzor založený na tomto principu má velmi široké pole využití a je hojně rozšířen v mobilních telefonech, ovladačích herních konzolích a podobně. Lze díky němu měřit pohyb tělesa v prostoru ale také díky speciálním aplikacím například rozeznávat specifické vibrace, a ty analyzovat. Senzor lze ale také využít k měření orientace v prostoru, a to díky působení gravitační síly Země. Nevýhodou při měření orientace v prostoru pomocí akcelerometru je citlivost na translační pohyb senzoru. Při aplikaci translačního pohybu na akcelerometr měřící orientaci v prostoru dochází ze zkreslování naměřených dat. Na trhu lze nalézt velké množství výrobců senzoru tohoto typu s různými počty měřených os, rozsahy měření a citlivostmi. Cena senzoru pro jednoduché aplikace se pohybuje v desítkách korun.

3.2.3 Gyroskop

Gyroskop, nebo také setrvačnický je mechanismus využívající principu točivého momentu rotujícího tělesa, který jako první popsal Johann Bohnenberger roku 1817. Setrvačnický gyroskop je umístěn v tzv. Cardanových závěsech, které mu umožňují volnost vůči podložce. Takto umístěný rotující setrvačnický je schopen držet svou pozici nezávisle na pohybu podložky. Přesnost gyroskopu je velmi závislá na kvalitě zpracování mechanických částí. Ložiska Cardanova závěsu by měla být ideálně bez tření. Gyroskop se využívá převážně jako zařízení pro navigaci, samostatný setrvačnický nalézá uplatnění jako stabilizační prvek.

MEMS gyroskop je elektronická součástka schopná podávat informace vedoucí ke znalosti orientace v prostoru. Princip gyroskopu je zde přenesen do substrátu křemíku a k měření úhlové rychlosti v osách rotace gyroskopu je využito Coriolisova principu.

Na obrázku Obr. 5 je zobrazena struktura jedno osého gyroskopu. Dvě pohyblivá tělesa jsou udržována v neustálém tahu, každé ve směru modrých šipek. V momentu aplikace úhlové rychlosti na senzor ve směru červené šipky vznikají Coriolisovy síly, znázorněné oranžovými šipkami, které jsou orientovány ortogonálně k vytvářenému tahu. Tyto síly způsobí posun měřících těles proporcionálně závislý na velikosti aplikované úhlové rychlosti na tělo senzoru. Pohyb těchto těles, která představují elektrody kondenzátoru, vůči elektrodám tvořeným statickou částí senzoru, způsobí změnu elektrické kapacity. Tato změna je převedena na elektrické napětí, které je dále zpracováváno elektronickou částí MEMS gyroskopu. [5]



Obr. 5 – Struktura jedno osého gyroskopu. [5]

Výstupem gyroskopického MEMS senzoru je jeho úhlová rychlost v měřených osách. Pro znalost orientace senzoru v ose X v různých časových okamžicích je zapotřebí znát výchozí polohu senzoru, aktuální úhlovou rychlost v měřené ose a periodu vzorkování. Úhel φ_x lze počítat podle vzorce:

$$\varphi_x = \sum \phi_x \cdot \Delta t + \varphi_{x0} \quad [rad] \quad (2)$$

kde ϕ_x je měřená úhlová rychlost $\left[\frac{rad}{s} \right]$,

Δt perioda měření [s],

φ_{x0} výchozí náklon senzoru [rad].

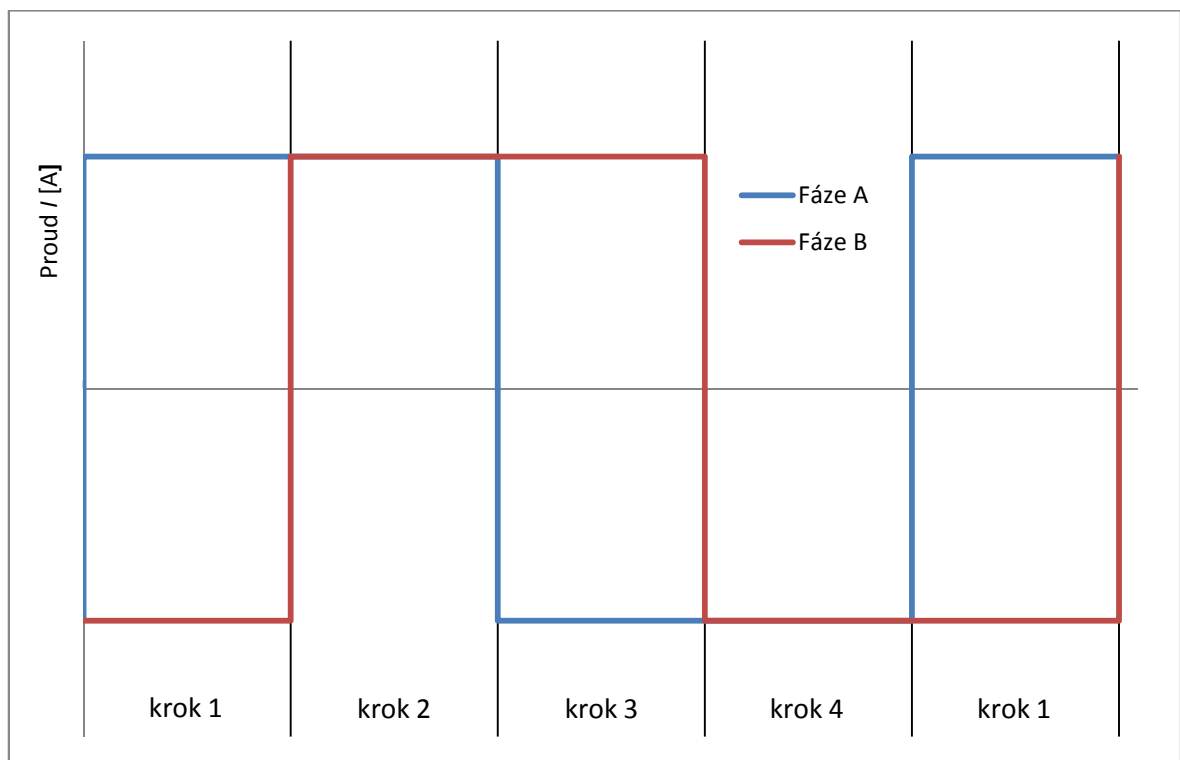
Podobně jsou vypočítávány úhly otočení okolo os Y a Z.

4 KROKOVÝ MOTOR

Motor obecně je zařízení převádějící elektrickou energii na energii mechanickou, ať už rotační anebo translační. Krokový motor v tomto ohledu není výjimkou. Výjimečnost spočívá v možnosti otáčet rotorem krokového motoru v přesně definovaných krocích. Toto je umožněno speciální konstrukcí rotoru a statoru tohoto typu motoru a speciálním řízením. Možností řízení tohoto typu motoru existuje několik a z těchto si tato kapitola klade za cíl přiblížit možnosti řízení v režimu celo-krok a microstepping.

4.1 Celo-krok

Délka jednoho celého kroku je závislá na počtu fází statoru, a počtu zubů rotoru, což jsou konstrukčně dané veličiny. Přiváděním obdélníkového fázově posunutého signálu na fáze statorového vinutí je pak docíleno pohybu v těchto definovaných krocích, podle obrázku Obr. 6. Výhoda tohoto typu řízení je v relativní jednoduchosti, velkými nevýhodami je však nespojitý chod rotoru, projevující se nejvíce v nízkých rychlostech otáčení a kmitání po přechodu rotoru do nové stabilní polohy. Tyto dva faktory jsou pak zodpovědné za značné mechanické vibrace.

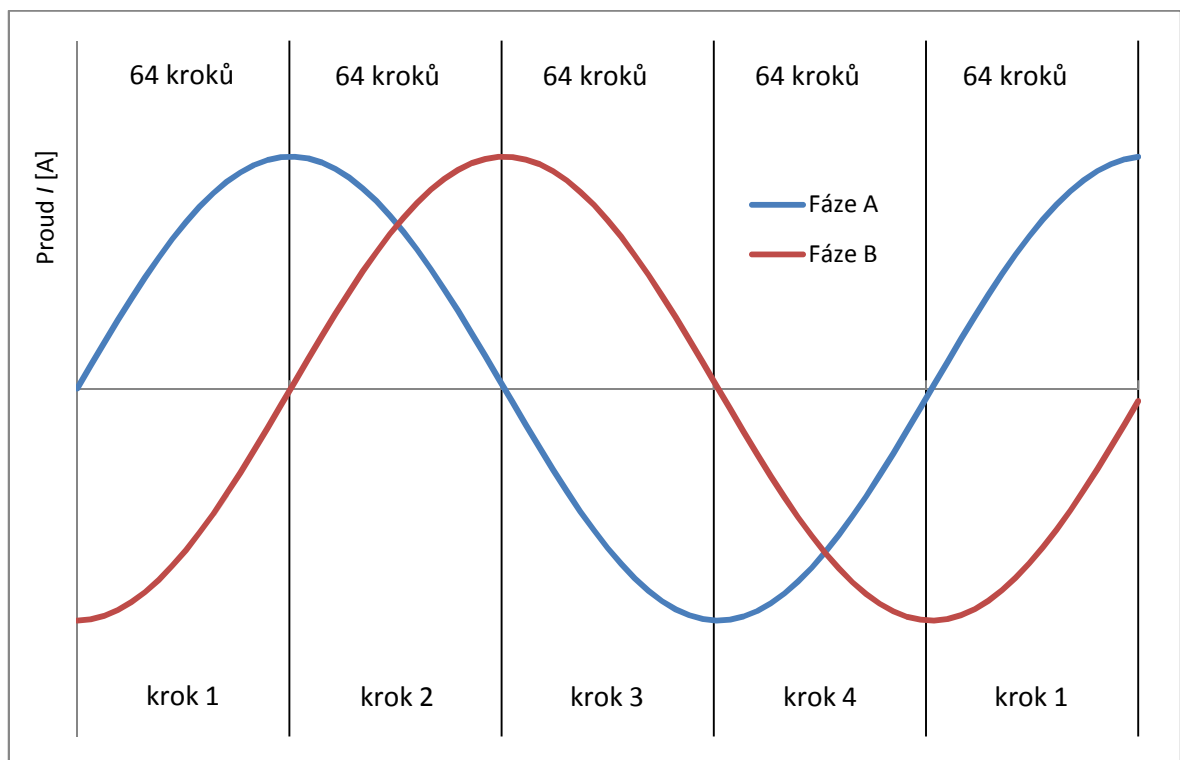


Obr. 6 – Obdélníkový budící signál krokového motoru.

4.2 Microstepping

Snížení velikosti kroku je možno změnou konstrukce motoru anebo, a to především, snížením počtu kroků řídicí elektronikou. Tohoto je docíleno buzením fází krokových motoru tak, aby výsledný tok magnetického pole byl umístěn mezi osami magnetického pole jednotlivých budících cívek. Pole rotoru se pak ztotožňuje s tímto magnetickým polem a je díky tomu možno dosáhnout více klidových stavů.

Microstepping, jak se elektronické snížení délky kroků označuje, je v této aplikaci na úrovni 256 mikro-kroků na jednu otáčku magnetického pole statoru. Znamená to, že jeden celý krok (obdélníkové buzení fází statoru) je elektronicky rozdělen na 64 mikro-kroků. Plynulého chodu je docíleno tak, že úroveň budícího proudu fázemi statoru je funkcí sinus. Díky tomuto je dosaženo nižších mechanických vibrací motoru, i když je pohyb stále nespojitý. Obrázek níže (Obr. 7) ilustruje rozdělení celých kroků na mikro-kroky.



Obr. 7 – Funkce sinus budícího proudu microsteppingu.

5 IDENTIFIKACE SYSTÉMU

Neodmyslitelným předpokladem efektivního řízení je znalost regulovaného systému a jeho vlastností. K takovému poznání systému slouží identifikace systému. Dokonalost a přesnost znalostí vlastností řízeného objektu je předpoklad pro jeho optimální řízení. Se snižující se znalostí systému, efektivita řízení klesá. [6, s. 7]

Identifikaci daného objektu lze provádět analytickým nebo experimentálním způsobem.

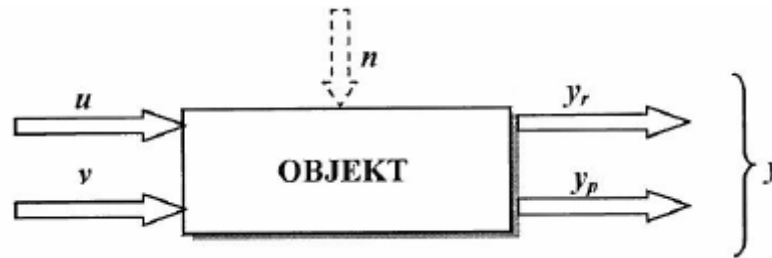
5.1 Analytický způsob

Analytický způsob identifikace je založen na matematicko-fyzikální analýze objektu, která sestavuje jeho matematický model. Vychází se přitom z konstrukčních, technologických a provozních informací o daném objektu. Podle fyzikálních, chemických a dalších zákonů jsou matematicky popsány jevy probíhající v objektu, a tím jsou získány vazby mezi sledovanými veličinami. Tyto vazby určují matematický model vyšetřovaného objektu. Hloubka poznávání těchto vazeb a struktury objektu, do které je proniknuto, záleží na účelu použití daného modelu. Čím hlouběji je analýza provedena, tím přesnější by měl být matematický model. Tato hlubší analýza však bude mnohem složitější, nákladnější a její odvození pracnější a používání náročnější. [6, s. 11]

Pro analytickou identifikaci objektu představovaného dvoukolovým nestabilním robotem by mohlo být s výhodou využito řešení zpodobněním s úlohou matematického inverzního kyvadla, případně řešením pomocí Lagrangeových rovnic. Nevýhodou těchto přístupů je však závislost na znalosti fyzikálních vlastností jednotlivých částí řešeného objektu. Jejich nepřesnost, či neznalost je pak příčinou nepřesného matematického popisu objektu, jehož využití pro návrh efektivního řízení je zavádějící.

5.2 Experimentální způsob

Experimentální identifikace využívá údaje a informace získané o objektu, ať už v průběhu jeho pozorování při jeho normálním provozu, anebo při vhodně zvoleném experimentu. Použitím vstupních a jim odpovídajících výstupních dat změřených na zkoumaném objektu, lze určit jeho matematický model, parametry a strukturu. Experiment identifikace je navržen na základě dostupných informací o zkoumaném objektu, případně o objektu podobného charakteru. [6, s. 30]



Obr. 8 – Schématické znázornění objektu. [6, s. 30]

Veličiny, které je možno při identifikaci objektu měřit, se dělí na řídicí vstupní veličiny u – akční veličiny, pomocí těchto je realizováno řízení objektu a výstupy objektu y . Výstupní veličina y zahrnuje jak veličiny, které jsou řízeny y_r , tak pomocné měřené veličiny y_p , jejichž regulace se nevyžaduje, ale znalost průběhu těchto veličin pomáhá ke zvýšení kvality řízení. Objekt ovlivňují také externí měřitelné poruchy v . Externí poruchy v zahrnují veličiny, které na objekt působí tak, že výstup systému je jimi ovlivněn. Časový průběh poruchové veličiny není na akčních veličinách závislý. Výstup objektu je dále ovlivňován náhodnou neměřitelnou poruchou n , do níž jsou zahrnuty všechny neměřitelné vlivy okolí, chyby měření i změny uvnitř samotného objektu, jež ovlivňují chování objektu, ale není možné je měřit, či předpovídat. [6, s. 30]

5.2.1 Deterministické metody

Metody experimentální identifikace, patří mezi nejstarší identifikační metody. Jsou těsně spjaty s historickým vývojem teorie automatické regulace a jsou hlavně pro svoji jednoduchost v praxi často používány. Na významu neztrácí rovněž z toho důvodu, že slouží pro parametrizaci modelů ze získaných neparametrických forem ve tvaru grafických průběhů anebo tabulačního zápisu výsledků získaných měřením. Využívají tzv. standardní testovací signály, které jsou v teorii systémů označovány jako:

- jednotkový skok,
- jednotkový (Diracův) impuls,
- harmonický signál,
- obecný signál. [6, s. 61]

Tyto metody identifikace jsou použitelné na lineární stabilní dynamické systémy, mezi které dvoukolový nestabilní robot nepatří. Proto je tato kategorie identifikačních metod nepoužitelná v této aplikaci.

5.2.2 Stochastické metody

Stochastické metody identifikace využívají na rozdíl od deterministických metod náhodných vlivů a poruch, které ovlivňují vstupy a výstupy identifikovaného objektu. Experimentální měření je tedy možné provádět bez nutnosti generování specifických signálů na vstupu zkoumaného objektu. Měření může být provedeno bez omezení chodu zkoumaného objektu. Stochastické metody lze rozdělit do dvou skupin:

- Korelační a disperzní,
- Regresní metody.

Korelační a disperzní metody stanovují vazby mezi vstupními a výstupními veličinami objektu.

Regresní metody využívají regresní analýzu a teorii odhadu, při nichž je snaha náhodné poruchy a chyby odfiltrovat a vhodnou aproximací analyticky vyjádřit vyšetřovanou funkční závislost. Regresní metody identifikace jsou výpočetně velmi náročné. [6, s. 98]

Mezi regresní metody identifikace patří metoda nejmenších čtverců, která je také využita pro tuto aplikaci.

5.2.2.1 Metoda nejmenších čtverců

Při metodě nejmenších čtverců se odhady parametrů přenosu systému a_i získají na základě kritéria minimálního součtu kvadrátů chyby $e(k)$ (3). Kritérium nabývá minima, jsou-li parciální derivace podle jednotlivých parametrů rovny nule. Je tak získána soustava N rovnic o r neznámých a jejich řešením jsou odhady parametrů a_i . Odvození metody nejmenších čtverců je převzato z literatury. [6, s. 103, 104]

$$J = \sum_{k=1}^N e^2(k) = \sum_{k=1}^N [y(k) - y_m(k)]^2 = \sum_{k=1}^N \left[y(k) - \sum_{i=1}^r a_i f_i(k) \right]^2 \quad (3)$$

kde $e(k)$ je chyba,
 $y(k)$ naměřené hodnoty,
 $y_m(k)$ modelové hodnoty,
 a_i parametry systému,
 $f_i(k)$ regresory,
 N počet naměřených vzorků,

r počet parametrů.

Soustava N rovnic, odvozená postupným dosazováním naměřených hodnot za $y(k)$, má tvar:

$$\begin{aligned} y(1) &= a_1 f_1(1) + a_2 f_2(1) + \dots + a_r f_r(1) + e(1) \\ y(2) &= a_1 f_1(2) + a_2 f_2(2) + \dots + a_r f_r(2) + e(2) \\ y(N) &= a_1 f_1(N) + a_2 f_2(N) + \dots + a_r f_r(N) + e(N) \end{aligned} \quad (4)$$

Po zavedení vektorů $\mathbf{y}^T, \mathbf{\Theta}^T, \mathbf{e}^T$ a matice \mathbf{F} lze rovnice zapsat ve tvaru:

$$\begin{aligned} \mathbf{y}^T &= [y(1) \quad y(2) \quad \dots \quad y(N)] \\ \mathbf{\Theta}^T &= [a_1 \quad a_2 \quad \dots \quad a_r] \\ \mathbf{e}^T &= [e(1) \quad e(2) \quad \dots \quad e(N)] \end{aligned} \quad \mathbf{F} = \begin{bmatrix} f_1(1) & f_2(1) & \dots & f_r(1) \\ f_1(2) & f_2(2) & \dots & f_r(2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ f_1(N) & f_2(N) & \dots & f_r(N) \end{bmatrix} \quad (5)$$

Maticovou rovnicí výše lze po úpravě zapsat ve tvaru:

$$\mathbf{e} = \mathbf{y} - \mathbf{F}\mathbf{\Theta} \quad (6)$$

Kvadratické kritérium J lze nyní zapsat ve tvaru:

$$J = \mathbf{e}^T \mathbf{e} = (\mathbf{y} - \mathbf{F}\mathbf{\Theta})^T (\mathbf{y} - \mathbf{F}\mathbf{\Theta}) \quad (7)$$

Minimum tohoto kvadratického kritéria je pak získáno položením jeho derivace podle parametrů $\mathbf{\Theta}$ rovnu 0. Řešením je pak získán základní maticový tvar pro odhad parametrů metodou nejmenších čtverců:

$$\mathbf{\Theta} = (\mathbf{F}^T \mathbf{F})^{-1} \mathbf{F}^T \mathbf{y} \quad (8)$$

6 REGULACE SYSTÉMU

Regulační obvod je uzavřený systém, jehož základ tvoří dva prvky – regulátor a regulovaná soustava. Regulační obvod je převážně zaváděn za účelem asymptotického sledování referenčního signálu (žádané hodnoty) regulované veličiny. Mezi další základní požadavky na systém řízení mohou být zahrnuty tyto:

- Stabilita systému řízení.
- Vnitřní ryznost systému řízení (přenosy všech prvků regulačního obvodu musí být ryzí, tzn. fyzikálně realizovatelné.
- Úplná kompenzace poruchy vstupující do systému řízení.
- Požadovaná kvalita řízení. [7, s. 21]

6.1 Konvenční metody syntézy

Konvenční metody návrhu regulátoru vycházejí z pevně dané struktury PSD regulátoru ve tvaru (9). Parametry tohoto typu regulátoru jsou pak vypočteny na základě metod k tomu určených. Mezi tyto patří například metoda Ziegler-Nicholase nebo Metoda požadovaného modelu, ať už přímo v jejich diskretních modifikacích, nebo ve spojité oblasti s následným přepočtem do oblasti diskrétní.

$$Q(z) = \frac{q(z)}{p(z)} = \frac{q_2 z^2 + q_1 z + q_0}{z^2 - z} \quad (9)$$

Nevýhodou těchto metod sestávajících z několika empirických vztahů pro výpočet parametrů regulátoru je povětšinou neefektivní průběh regulované veličiny. Tímto způsobem návrhu parametru regulátoru také nemusí být docíleno stability systému.

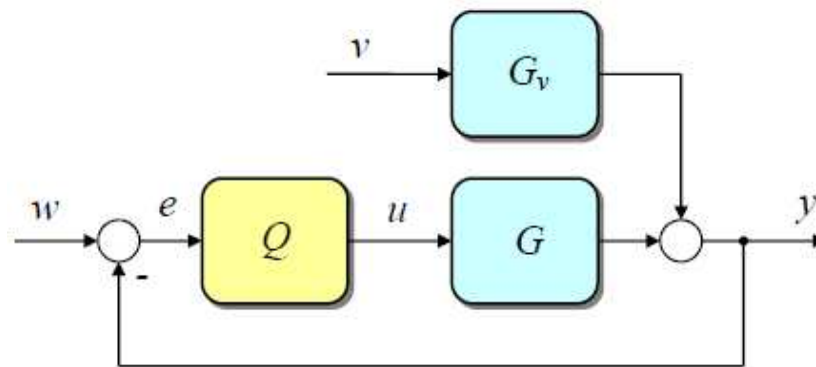
6.2 Polynomiální metody syntézy

Polynomiální přístup k syntéze systémů řízení je významnou součástí teorie automatického řízení. Metoda je založena na vstupně – výstupních relacích na lineárním časově invariantním řízeném systému. Polynomiální metoda vychází z racionálních přenosů pro lineární systémy, které chápe jako podíly dvou polynomů. Návrh regulátorů je pak realizován cestou řešení polynomiálních rovnic. Výhodou metody je, že výsledné vztahy pro výpočet parametrů jsou jednoduše programovatelné.

6.2.1 Návrh regulátoru 1DOF konfigurace systému řízení polynomiální metodou

Polynomiální metody návrhu regulátorů mohou být stejně jako konvenčních metody syntézy využity k návrhu tradičních typů regulátoru (nejčastěji se jedná o regulátory ze třídy PSD). Polynomiální metoda syntézy systému řízení však určuje rovnice pro výpočet parametrů regulátoru na základě požadavků na řízení a často také určuje strukturu regulátoru. Metoda je použitelná i pro návrh řízení systémů s neminimální fází, systémů s integračními vlastnostmi, systémů nestabilních a pro libovolné vstupní signály (referenční signál a poruchu), které jsou však matematicky popsitelné. Struktury výsledných regulátorů mohou být netradiční. [7, s. 21]

Označení konfigurace 1DOF vzniklo z anglického one degree of freedom (jeden stupeň volnosti). Jedná se o klasickou konfiguraci se zpětnovazebním regulátorem. Schéma zapojení je na obrázku (Obr. 9). [7, s. 22]



Obr. 9 – 1DOF konfigurace systému řízení. [7, s. 22]

G a G_v představují řízený systém s odpovídajícími přenosy (10), Q je zpětnovazební regulátor, y řízený výstup, u akční veličina, w referenční signál (žádaná hodnota výstupu), e regulační odchylka a v porucha vstupující do řízeného systému.

$$G(z) = \frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{b(z)}{a(z)} \quad G_v(z) = \frac{Y(z)}{V(z)} = \frac{c(z)}{a(z)} \quad (10)$$

Přenos regulátoru je uvažován ve tvaru podílů nesoudělných polynomů $q(z)$ a $p(z)$ (11) s podmínkou jejich ryzosti (fyzikální realizovatelnosti) (12).

$$Q(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = \frac{q(z)}{p(z)} \quad (11)$$

$$\deg q(z) \leq \deg p(z) \quad (12)$$

Obrazy obou vstupních signálů jsou uvažovány rovněž ve tvaru podílu polynomů:

$$W(z) = \frac{h_w(z)}{f_w(z)} \quad V(z) = \frac{h_v(z)}{f_v(z)} \quad (13)$$

Obrazy řízeného výstupu $Y(z)$ a akčního výstupu $U(z)$ popisují rovnice:

$$Y(z) = G(z)U(z) + G_v(z)V(z) = \frac{b(z)}{a(z)}U(z) + \frac{c(z)}{a(z)}V(z) \quad (14)$$

$$U(z) = Q(z)E(z) = Q(z)[W(z) - Y(z)] = \frac{q(z)}{p(z)}[W(z) - Y(z)]$$

Po úpravách rovnic výše je možno pro základní signály v regulačním obvodu dosadit vztahy (15) kde $d(z) = a(z)p(z) + b(z)q(z)$:

$$Y(z) = \frac{1}{d(z)}[b(z)q(z)W(z) + c(z)p(z)V(z)]$$

$$E(z) = \frac{p(z)}{d(z)}[a(z)W(z) - c(z)V(z)] \quad (15)$$

$$U(z) = \frac{q(z)}{d(z)}[a(z)W(z) - c(z)V(z)]$$

Obrazy všech signálů mají ve jmenovateli polynom d – charakteristický polynom přenosu uzavřeného regulačního obvodu. Tento polynom v sobě obsahuje známé polynomy $a(z)$, $b(z)$ z přenosu řízeného systému a prozatím neznámé jsou polynomy $q(z)$ a $p(z)$ z přenosu regulátoru. Podmínku stability uzavřeného regulačního obvodu je nyní možno definovat následovně:

Systém řízení (regulační obvod) je stabilní tehdy, jestliže polynomy $q(z)$ a $p(z)$ v přenosu zpětnovazebního regulátoru jsou řešením polynomiální rovnice

$$a(z)p(z) + b(z)q(z) = d(z) \quad (16)$$

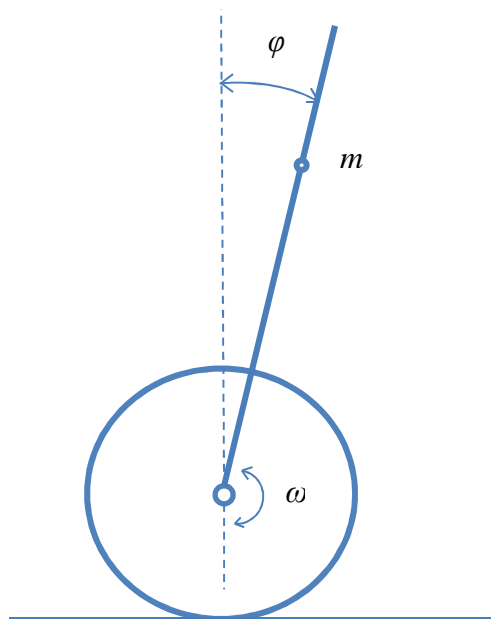
Se stabilním polynomem $d(z)$ na pravé straně.

Mezi tyto metody patří také metoda návrhu parametrů metodou umístění pólů, při které jsou polynomy regulátoru $q(z)$ a $p(z)$ vypočteny na základě požadovaného umístění pólů charakteristické rovnice uzavřeného regulačního obvodu.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

7 POPIS MODELU

Schématický model dvoukolového robota s vyznačením veličin popisujících stav robota v prostoru je zobrazen na obrázku níže (Obr. 10). Jak geometrický model ukazuje, je těžiště modelu m nad osou otáčení kol, což má za následek, že se robot nalézá v nestabilní poloze. Pro udržení této polohy je potřeba zavést řídicí elektroniku s uvažovaným uzavřeným regulačním obvodem 1DOF s číslicovým regulátorem a sensorikou pro měření náklonu a akční členy – krokové motory, jež zajišťují potřebné balancování modelu s cílem udržet těžiště robota nad osou kol. Regulovanou veličinou je náklon těla robota od vektoru gravitační síly (kolmice s podložkou robota), v níž je robot v rovnovážném, stabilním stavu. Tento náklon je vyjádřen veličinou φ [°]. Akčním zásahem je úhlová rychlost kol robota ω [°/s].

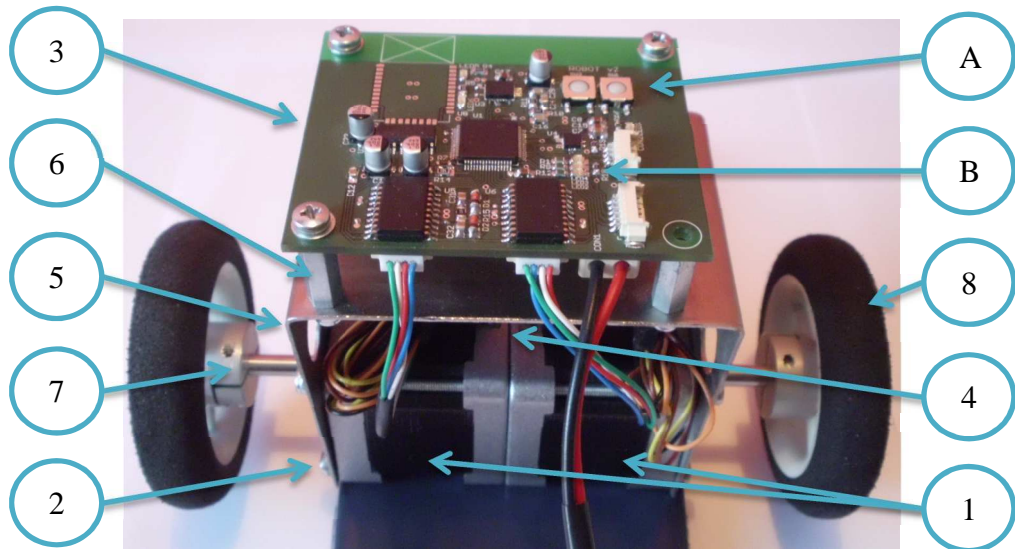


Obr. 10 – Schématický model robota.

Model je postaven na dvojici krokových motorů (1), jež jsou spolu pevně spojeny závitovými tyčemi (2). Nosnou konstrukcí pro řídicí elektroniku (3) a baterii (4) vytváří šasi (5), které je vyrobeno z nerezového plechu. Elektronika je k šasi připevněna čtveřicí distančních sloupků (6) a baterie suchým zipem, pro jednoduché a rychlé vyjmutí při nabíjení. Hřídele krokových motorů svírají hřídelové spojky (7) upravené pro připevnění kol (8).

Dominantní je na modelu řídicí elektronika, která je integrována na jedné desce plošných spojů (DPS). Tato deska obsahuje elektronické součástky, konektory, signalizační LED

diody a ovládací prvky, které umožňují práci s modelem. Ovládacími prvky jsou dvě tlačítka (A) na DPS označené jako SW1 a SW2. Účely jednoduché signalizace stavu modelu splňuje čtveřice LED diod (B). Funkce tlačítek i signalizačních LED diod je uvedena v kapitole 11.4 Práce s modelem.



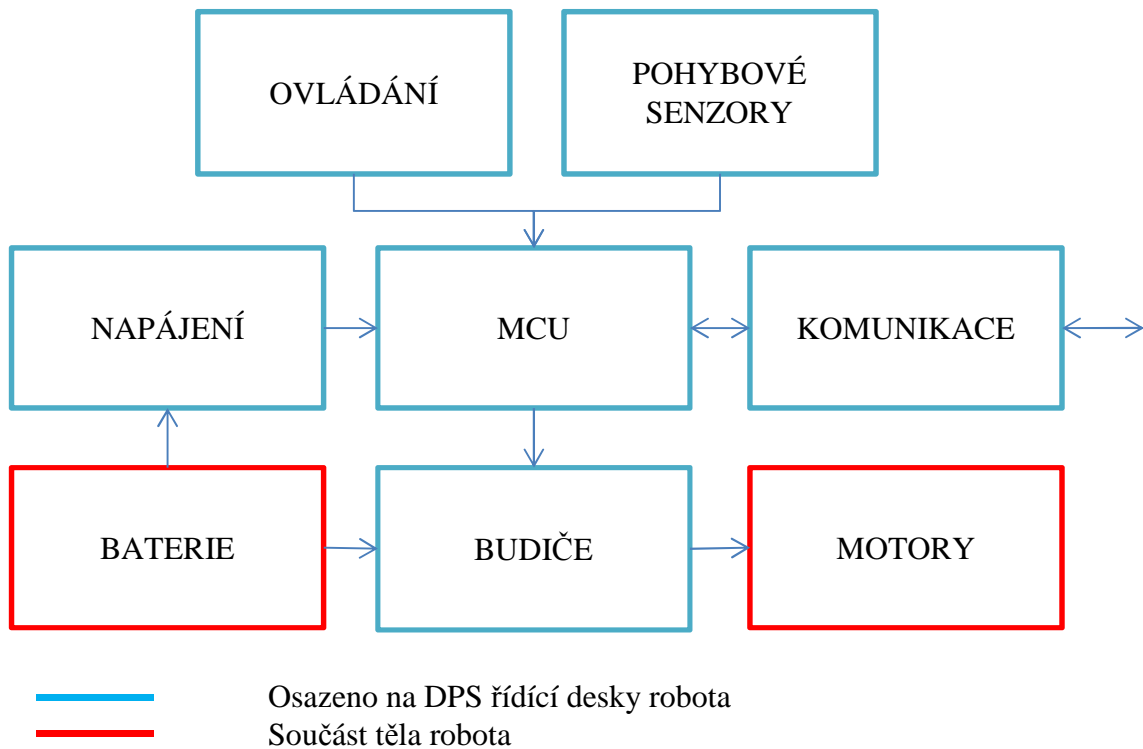
Obr. 11 - Dvoukolý nestabilní robot.

Šasi modelu je v ose otáčení ve tvaru písmene V, s tím, že v horní části je šířka šasi shodná s průměrem kol, což zajišťuje ochranu řídicí elektroniky před nárazem na podložku v případě pádu robota. Ve spodní části je šířka šasi shodná s rozměrem motorů, to proto, aby byla zajištěna možnost otáčení těla robota v ose hřídelí motorů. Otvory po stranách robota jsou vytvořeny z důvodu odlehčení modelu a pro případné přichycení kabeláže.

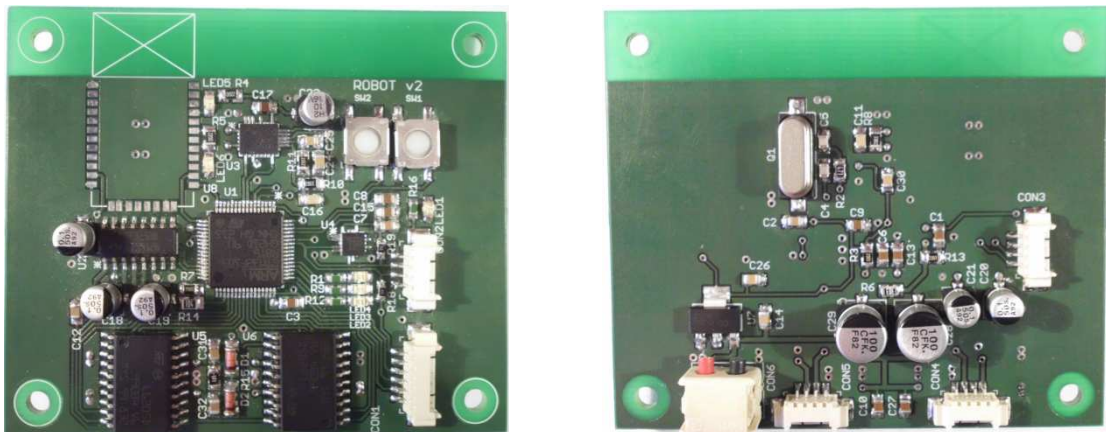
Výkresová dokumentace šasi je přiložena v Příloze III.

8 HARDWARE

Robot je osazen řídicí elektronikou, jejíž úlohou je udržovat robota ve stabilní, svislé poloze. K udržení robota v této poloze je zapotřebí znát aktuální náklon těla robota ve směru otáčení (v ose kol) a na základě této hodnoty realizovat akční zásah, ten představuje úhlová rychlost kol robota. Tento akční zásah je vypočten řídicím algoritmem robota. Blokové schéma elektroniky je na obrázku (Obr. 12), reálné provedení řídicí elektroniky pak na obrázku (Obr. 13). Popis jednotlivých bloků je uveden v kapitolách níže.



Obr. 12 – Blokové schéma řídicí elektroniky + periferii.



Obr. 13 – DPS robota, horní a spodní strana.

8.1 Mikrokontroler

Srdcem řídicí elektroniky robota je mikrokontroler s architekturou ARM od firmy STMicroelectronics (dále jen STM). Firma STM má ve svém portfoliu řadu mikrokontrolerů s různými frekvencemi jádra, periferiemi, počty vývodů atd. Tento byl vybrán na základě podrobné analýzy potřebného výkonu a periferií.

Osazeným mikrokontrolerem je STM32F103R8T6. Jedná se o 32 – bitový mikrokontroler s jádrem Cortex-M3 s CPU frekvencí až 72MHz, 20KB SRAM a 64KB Flash paměti, čtyřmi časovači, dvěma A/D převodníky se 16 – ti kanály, řadou komunikačních periferií (SPI, IIC, UART, USB, CAN) a 51 GPIO porty. Mikrokontroler je umístěn v pouzdře LQFP64 a jeho napájecí napětí je v rozsahu 2 – 3,6V.

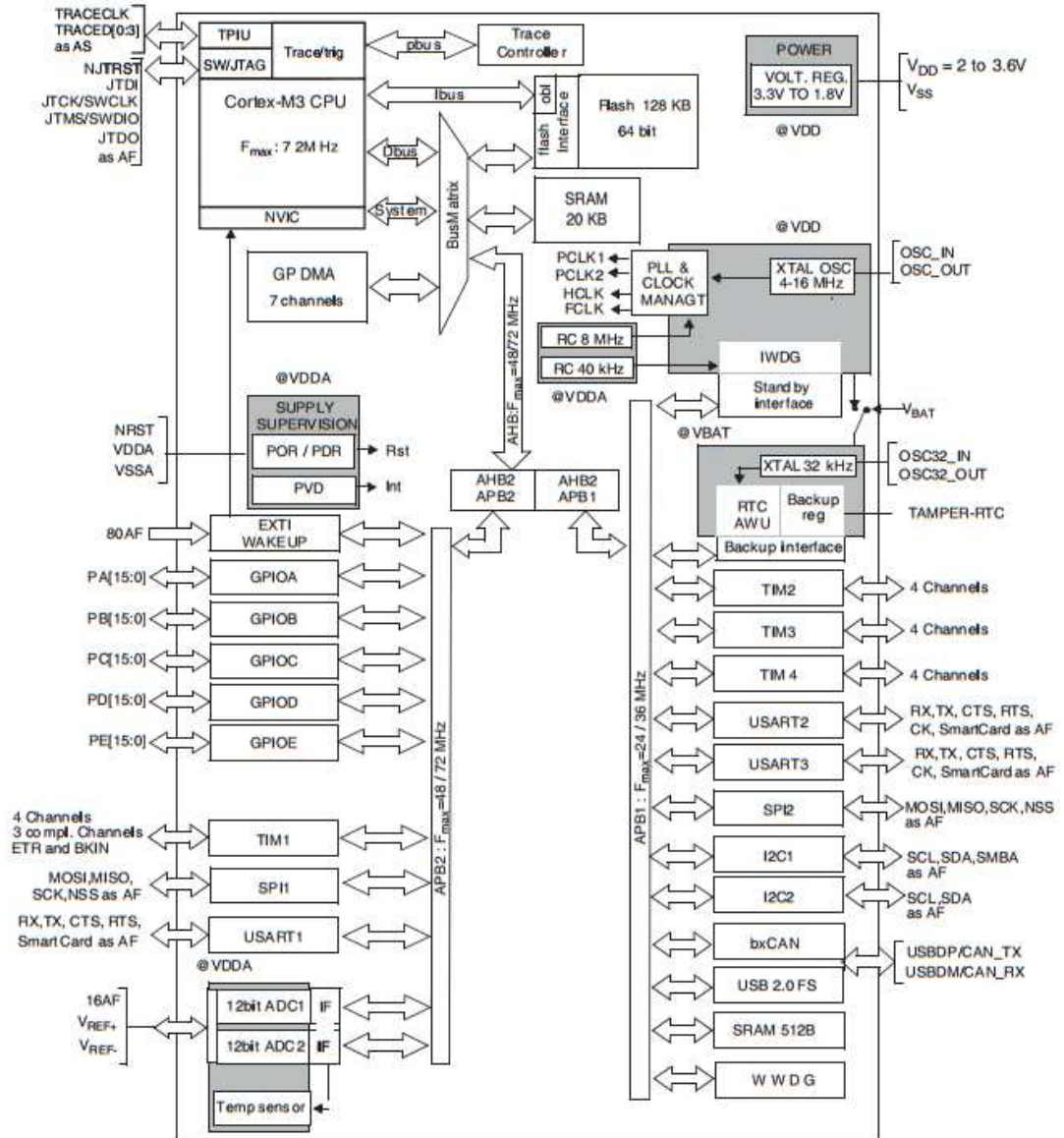
Blokové schéma mikrokontroleru na obrázku (Obr. 14) ukazuje jednotlivé části mikrokontroleru, spojení jádra Cortex – M3 s paměťmi a programovacími prostředky, dále pak zapojení jednotlivých periferií na dva hlavní hodinové signály označené jako APB1 a APB2 s tím, že APB1 má maximální frekvenci shodnou s frekvencí CPU, a to 72MHz, APB2 má proti tomu maximální frekvenci hodinového signálu poloviční – 36MHz. Hodinový signál je generován pomocí bloku PLL & Clock Management.

Programování a debug programu tohoto typu mikrokontroleru je možný přes rozhraní JTAG/SWD. V tabulce níže (Tab. 1), je uvedeno zapojení pinů pro tyto rozhraní. Možné konfigurace jsou celkem čtyři, výběr konfigurace se provádí v registru Alternate Function remap and debug I/O configuration register (AFIO_MAPR) parametrem SWJ_CFG. Tato aplikace využívá rozhraní SWD pro nižší nároky na počet pinů.

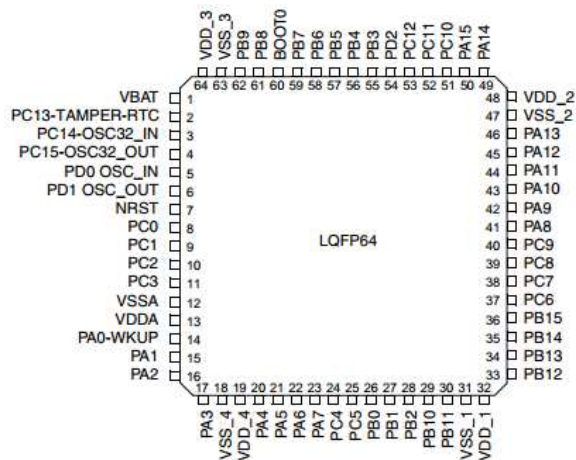
SWJ_CFG [2:0]	Available debug ports	SWJ I/O pin assigned				
		PA13 / JTMS/ SWDIO	PA14 / JTCK/S WCLK	PA15 / JTDI	PB3 / JTDO/ TRACE SWO	PB4/ NJTRST
000	Full SWJ (JTAG-DP + SW-DP) (Reset state)	X	X	X	X	X
001	Full SWJ (JTAG-DP + SW-DP) but without NJTRST	X	X	X	x	free
010	JTAG-DP Disabled and SW-DP Enabled	X	X	free	free ⁽¹⁾	free
100	JTAG-DP Disabled and SW-DP Disabled	free	free	free	free	free
Other	Forbidden					

1. Released only if not using asynchronous trace.

Tab. 1 – Registr AFIO_MAPR. [8, s. 172]



Obr. 14 – Blokové schéma mikrokontroleru. [9, s. 11]

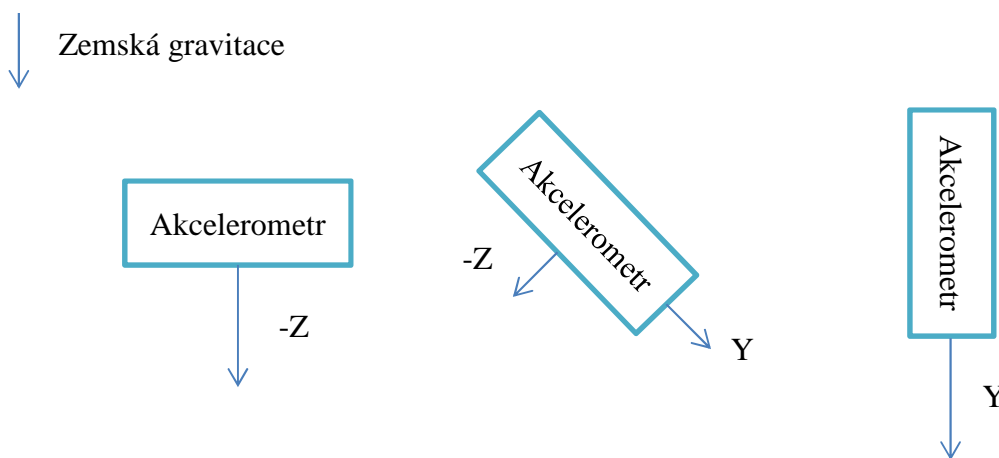


Obr. 15 – Zapojení vývodů pouzdra LQFP64 [9, s. 24]

8.2 Akcelerometr

Akcelerometr od společnosti Freescale s označením MMA8452Q je na elektronické desce osazen pro možnost měření náklonu modelu s využitím měření gravitační síly působící na akcelerometr. Otáčením akcelerometru okolo osy X je gravitační síla na něj působící rozkládána v osách Y a Z. Měřením velikosti působící síly v těchto osách je získávána složka rozkladu výslednice sil. Výpočtem je pak určen úhel výslednice sil, jež představuje náklon robota φ [°]. Nevýhodou tohoto měření je velmi vysoká citlivost na změny pohybu akcelerometru. Jakýkoli pohyb je vyvolán zrychlením v příslušné ose pohybu. Toto zrychlení je pak zahrnuto do měření síly působící na akcelerometr v měřené ose a zavádí do měření náklonu chybu. Popis eliminace tohoto jevu je uveden v kapitole 10 Měření náklonu.

MMA8452Q je tří osý 12/8bitový digitální akcelerometr s nastavitelným rozsahem měření $\pm 2g$ / $\pm 4g$ / $\pm 8g$ a citlivostí až 1024counts/g (při rozsahu $\pm 2g$). Akcelerometr je vyroben technologií MEMS.

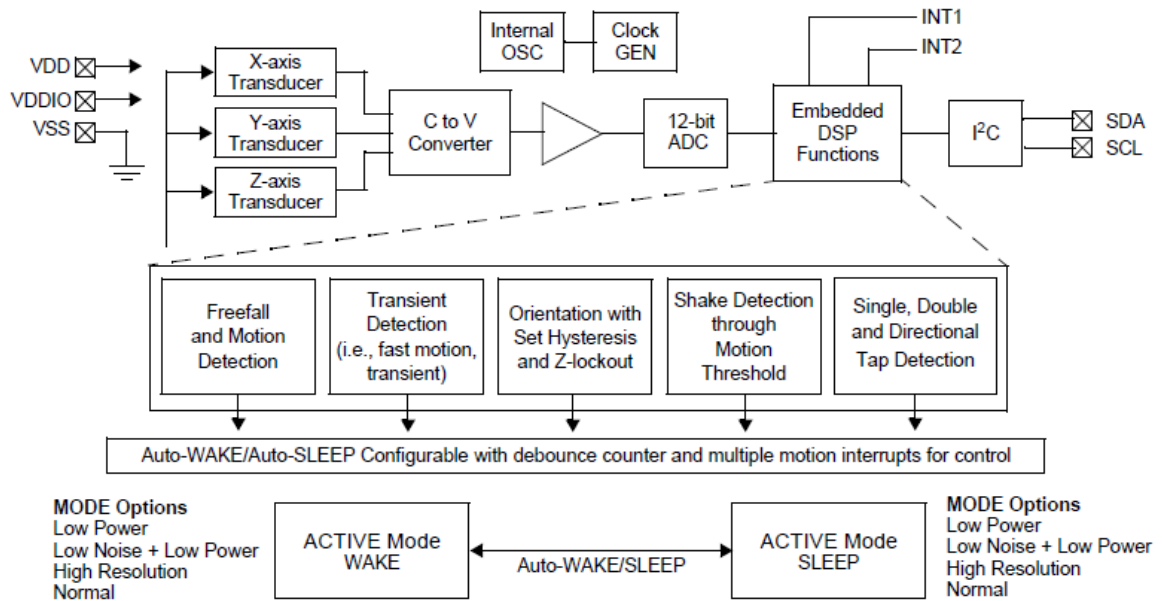


Pozn. Vektory velikostí sil nejsou zakresleny v měřítku.

Obr. 16 – Působení gravitační síly na akcelerometr

Akcelerometr MMA8452Q sestává ze tří MEMS snímačů pro osy X, Y a Z. Snímače jsou kapacitní a je proto potřeba převést měřená data z měřené veličiny kapacita C [F] na napětí U [V], toto napětí je dále zesíleno a jelikož se jedná o akcelerometr s digitálním výstupem tak převedeno A/D převodníkem. Tato, již digitální data jsou vyhodnocována integrovaným DSP procesorem. MMA8452Q má integrováno mnoho rozšiřujících funkcí, jakož jsou detekce volného pádu, pohybu, orientace a další, viz. blokové schéma na obrázku (Obr. 17). Akcelerometr má tedy velké pole možných aplikací, ve kterých je nutno

detekovat výše popsané specifické pohyby. V této aplikaci však žádná z rozšiřujících funkcí využita není. Výstupem z akcelerometru jsou zde 12 – ti bitová surová měřená data pro osy Y a Z (osa X není využita). Ty jsou načítány z vnitřních registrů akcelerometru s frekvencí 100Hz přes komunikační rozhraní IIC.



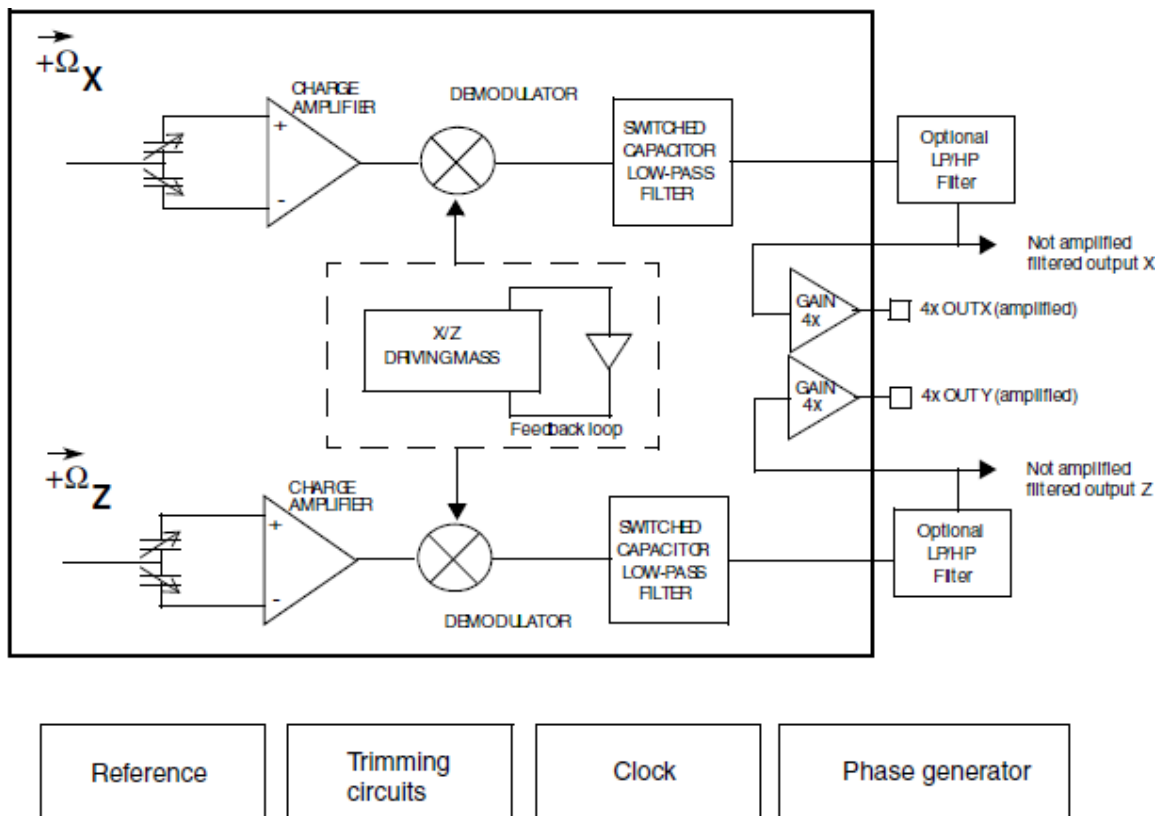
Obr. 17 – Blokové schéma akcelerometru. [10, s. 3]

8.3 Gyroskop

Gyroskop použitý v této aplikaci je vyráběn firmou STM, jedná se o dvou osý analogový gyroskop s maximálním rozsahem ± 6000 dps (degree per second – stupeň za sekundu), integrovaným signálovým zesilovačem a filtrem signálu s označením LPR4150.

Gyroskop je na DPS řídicí elektroniky osazen stejně jako akcelerometr z důvodu měření náklonu modelu robota. Ovšem naproti akcelerometru, který je popsán výše, zde není měření závislé na gravitačním poli Země. Zde je měřena úhlová rychlost otáčení kolem měřených os. Toto měření je stejně tak jako u akcelerometru prováděno kapacitním snímačem vyrobeným technologií MEMS. Měřená veličina kapacita $C[F]$, je pak převedena na napětí $U[V]$ a zesílena. Takto získaná data jsou filtrována integrovaným dolno-propustným filtrem, pokud je aktivován, a vyvedena výstupním pinem gyroskopu. Tento signál je již využitelný pro měření ale citlivost gyroskopu signálu na změnu úhlové rychlosti je velmi malá 0.167 mV/dps a je proto vhodné jej ještě před využitím mikrokontrolerem zesílit a dodatečně filtrovat. Na DPS je proto osazen dolno-propustný RC filtr. Takto filtrovaná data jsou dále 4 x zesílena operačním zesilovačem integrovaným

v pouzdře gyroskopu. Toto zesílení má za následek zvýšení citlivosti na změnu úhlové rychlosti na 0,67mV/dps, což je žádoucí ale má i negativní stránku. Touto negativní stránkou zesílení je snížení rozsahu měření. U nezesíleného signálu je rozsah měření ± 6000 dps u zesíleného signálu je tento rozsah omezen na 1500dps. Takovéto snížení však není omezující pro funkci modelu.



Obr. 18 – Blokové schéma gyroskopu. [11, s. 3]

8.4 H-můstek L6205

Pro potřebu řízení krokových motorů modelu je na DPS osazena dvojice budičů od firmy STM s označením L6205. Tyto budiče jsou vybaveny dvojitými DMOS můstky, logikou chránící proti nechtěnému zkratu na budičích, proudovou a tepelnou ochranou a napěťovou pumpou. Tato konfigurace umožňuje řídit tok proudu vinutími krokového motoru zajišťujícího pohyb modelu. Napájecí napětí motorů je u tohoto budiče 8 až 52V, proud je limitován 2.8A trvalé zátěže. V této aplikaci je výstupní proud maximálně 0,3A na jeden krokový motor a napájecí napětí je v rozmezí 8V (spodní hranice rozsahu budiče) až 13V (maximální napájecí napětí modelu robota).

L6205 má 6 logických pinů. Na každou fázi (H - můstek) tři piny. Těmito jsou vstupně výstupní pin EN – Enable, jež slouží k zapnutí H – můstku, další dva logické vstupy jsou určující pro určení směru toku proudu připojeným vinutím krokového motoru, jež slouží jako zátěž příslušného H – můstku. Vysvětlující pravdivostní tabulka významu vstupních pinů L6205 je uvedena níže (Tab. 2). Tabulka je uvedena pro jednu fázi L6205, stejná je však i pro druhou fázi.

INPUTS			OUTPUTS	
EN	IN1	IN2	OUT1	OUT2
L	X	X	High Z	High Z
H	L	L	GND	GND
H	H	L	Vs	GND
H	L	H	GND	Vs
H	H	H	Vs	Vs

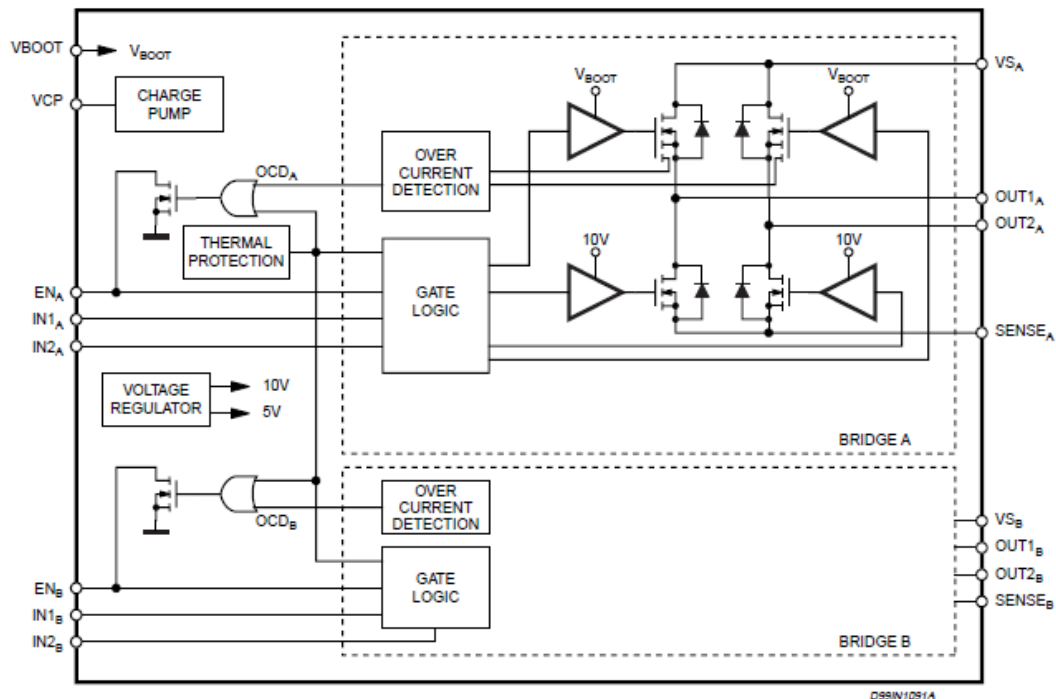
X = Don't care

High Z = High Impedance Output

Tab. 2 – Pravdivostní tabulka vstupů L6205. [12, s. 8]

Částečně integrovaná napěťová pumpa slouží ke zvýšení úrovně vstupního napětí na úroveň takovou, aby bylo možno spínat horní dvojici DMOS tranzistorů v H – můstkovém zapojení. Toto napětí je v blokovém schématu označeno jako Vboot. Plně integrován je převodník napětí na 5 a 10V jež slouží pro vnitřní logiku, respektive pro spínání dolní poloviny DMOS tranzistorů.

Posledním integrovaným prvkem je proudová a tepelná ochrana integrovaného obvodu, jež je napojena na vstupně výstupní pin EN. Při detekci vysoké proudové zátěže, případně překročení maximální teploty integrovaného obvodu je pin EN nastaven do log. 0. Tento stav uvede podle pravdivostní tabulky výstupní piny OUT1 a OUT2 do stavu vysoké impedance, což zamezí zničení integrovaného obvodu. Tento stav by v případě správně fungujícího zařízení neměl nikdy nastat. L6205 je pro tuto aplikaci dostatečně předimenzováno. Jedinou možností je přerušení izolace vodičů vedoucích ke krokovým motorům a následný zkrat.



Obr. 19 – Blokové schéma vnitřního zapojení L6205. [12, s. 1]

L6205 je mezi budiči krokových motorů vyráběných firmou STM v nejnižší řadě podle kritéria výkonu a integrace vlastní logiky. Pro tuto aplikaci však obsahuje vše potřebné, generování výstupního signálu potřebného pro správnou funkci krokových motorů je realizováno mikrokontrolerem. Tato problematika je blíže popsána v kapitole 9.1 Popis programu mikrokontroleru.

8.5 Bluetooth modul

DPS modelu je připravena k osazení Bluetooth modulu RovingNetworks s označením RN-42. Tento modul umožňuje komunikaci standardem bluetooth verze 2.1. Modul je plně integrován včetně antény. Frekvence komunikace je 2402 až 2480 MHz, výkon vysílače je 4dBm a citlivost přijímače -80dBm. Výrobce udávaný dosah zařízení je 20m na volném prostranství. Rychlost komunikace je nastavitelná v rozsahu 1,2 až 921 kBit/s. Komunikační rozhraní s mikrokontrolerem je typu UART.

DPS je pro případ doplnění o bluetooth modul osazena signalizačními LED5 a LED6, které signalizují správné párování modulu s jiným bluetooth modulem a přenos dat.



Obr. 20 – Bluetooth komunikační modul RN-42. [13]

8.6 Napájení

Rozsah napájecího napětí modelu se pohybuje v rozmezí 8 – 13V, proudový odběr je maximálně 700mA. K napájení je primárně využívána tříčlávková Li-pol baterie se jmenovitým napětím 11,1V, kapacitou 800mAh, maximálním vybíjecím a nabíjecím proudem 24A, respektive 0,8A. Silový konektor je typu BEC, servisní JST-XH. Při plně nabitě baterií je s modelem možno pracovat přibližně jednu hodinu.

Alternativou baterie je externí zdroj napájení v podobě například laboratorního zdroje.

8.7 Výroba DPS

Navržená deska plošných spojů vyžadovala výrobu u specializované firmy, a to hlavně z důvodu velkého počtu prokovů.

Označení pool servis je komerční označení pro výrobu DPS tak, že je najednou vyráběno několik vzorů DPS od různých zákazníků, což má za cíl snížení nákladů na výrobu prototypových DPS díky rozložení výrobních nákladů mezi více zákazníků. Tento způsob výroby s sebou však nese určitá omezení spočívající v jednotné technologii výroby, jež musí zákazník tolerovat.

Pro výrobu DPS tohoto modelu bylo využito služeb firmy PragoBoard s.r.o, jejíž technologie pool servisu je následující:

- Nosný materiál – FR4 1,5mm,
- Vodivá vrstva – měď 18 μ m,
- Nepájivá maska 2x,
- Servisní potisk 2x,

- H.A.S.L. (bezolovnatý hal),
- Obdélníkové frézování,
- Spoj/mezera $\geq 150 \mu\text{m}$, vrták $\geq 0,3 \text{ mm}$.

Vývojovým prostředkem DPS modelu lze generovat data, potřebná pro její strojovou výrobu. Těmito jsou Gerber data – pro vrstvy spojů, nepájivé masky, potisku a obrysu DPS a Excellon data pro vrtačku. Tato data jsou vytvářena pro každou vrstvu DPS, která se má vyrábět. V tomto případě to jsou vrstvy:

- Obrys,
- Spoje – horní a spodní,
- Nepájivá maska – horní a spodní.
- Potisk – horní a spodní
- Prokovené vrtání,
- Neprokovované vrtání.

Gerber a Excellon data jsou ve své podstatě sekvence příkazů a souřadnic, jež příslušné výrobní technologii přináší informaci o postupu výroby.

Příklad Gerber dat:

X018280Y006006D03*

X018280Y006754D03*

X012080Y009306D03*

X011280Y009306D03*

X011280Y010054D03*

X012080Y010054D03*

9 SOFTWARE

9.1 Popis programu mikrokontroleru

Obslužný program pro mikrokontroler osazený na DPS robota je napsán ve vývojovém prostředí KEIL uVision4, jež je popsáno v kapitole 12.3 Programování mikrokontroleru, v jazyce C. Program je rozdělen do několika funkcí, jejichž časování je postaveno na obsluhách přerušování od periférii mikrokontroleru, jež jsou v programu hojně využívány.

První funkci, jež je provedena po resetu mikrokontroleru, je inicializace mikrokontroleru a jeho vnitřních periférií (ADC, IIC, TIM, USART a EXTI) a inicializace akcelerometru. Po této inicializaci, jež je indikována rozsvícením všech indikačních LED diod je mikrokontroler uveden do režimu READY. V tomto režimu je mikrokontroler schopen přijímat data z PC, těmito daty jsou parametry řídicího algoritmu a čeká na spuštění chodu robota. Robot je schopen pracovat ve dvou režimech. V režimu ON-LINE, spustitelným stisknutím tlačítka SW1, je za parametry řídicího algoritmu dosazeno parametrů nastavených na ovládacím PC programu, naopak v režimu STAY-AWAY, jsou přijaté parametry ignorovány a jsou nastaveny výchozí, při nichž je robot schopen udržet se ve stabilní poloze. Po opětovném stisku tlačítka příslušného režimu je opět vyvolán stav READY.

Mikrokontroler je v této aplikaci využit jako regulátor náklonu robota, s tímto je spojena nutnost vykonávat s určitou periodou regulační zásahy a měřit aktuální náklon modelu robota. Periody jsou určeny časovači. Při doběhu časovače pro výpočet regulačního zásahu je na základě znalosti aktuální požadované hodnoty náklonu a úhlu náklonu vypočtena regulační odchylka a na základě regulačního algoritmu vypočten akční zásah, který je omezen na $\pm 900^\circ/\text{s}$. Akční zásah představuje úhlovou rychlost otáčení kol modelu robota. Vypočtený akční zásah je vstupem funkce realizující microstepping krokových motorů. Doběh časovače pro měření náklonu spustí funkci pro čtení dat akcelerometru prostřednictvím IIC sběrnice a spustí také A/D převodník, měřící výstupní signál z gyroskopu. Po získání dat je proveden výpočet aktuálního náklonu modelu robota podle kapitoly 10 Měření náklonu. Aktuální náklon robota, akční zásah, stav baterie a v neposlední řadě časová osa jsou odeslány komunikačním rozhraním do ovládacího programu spuštěnému na PC, kde jsou real-time vykreslovány.

Podstatnou funkcí mikrokontroleru je řízení krokových motorů. Ty jsou řízeny pomocí PWM signálu generovaného časovači TIM1 a TIM3 mikrokontroleru. Frekvence PWM je 20kHz (mimo slyšitelnou oblast). Generován je signál podle kapitoly 4.2 Microstepping.

9.2 Popis programu balancingROBOT

Ovládací program modelu je napsán v prostředí Visual Studio v jazyce C# s využitím nástroje Framework 4. Účelem programu je umožnit uživateli pracovat s modelem jako výukovou pomůckou a tuto práci mu co nejvíce ulehčit.

Základem programu je komunikace s modelem, ta je realizována sériovou linkou. Program tedy umožňuje výběr příslušného portu sériové linky, jejichž seznam je vždy po kliknutí na výběr aktualizován. Po úspěšném připojení je sledován s periodou 100ms příchozí buffer sériové linky, z něhož jsou načítána data odesílaná robotem. Po synchronizaci vzájemné komunikace jsou jednotlivé údaje odeslané robotem zobrazovány (pokud je zobrazování zapnuto) a ukládány do vnitřní paměti programu. Mimo statusu robota je zobrazování prováděno vykreslováním do grafu. Ve stavu READY je uživateli umožněno zadávat a odesílat parametry regulátoru. Ve stavech ON-LINE a STAY-AWAY je tato možnost potlačena, převážně z důvodu zatěžování mikrokontroleru příjmem a převodem přijatých dat, jež by mohlo způsobit chyby v časování. V režimu ON-LINE je pouze umožněno měnit požadovanou hodnotu náklonu robota, což má za následek jízdu robota. Tato změna je přenášena přes odesílací buffer sériové linky PC, prakticky v reálném čase. Program mimo zobrazování stavu s regulačních pochodů robota umožňuje ukládání dat do textového souboru. Příchozí data jsou pro tento účel ukládána do polí, jež jsou při požadavku na zápis do souboru stiskem tlačítka Save naformátována a uložena do odpovídajícího textového souboru. Textový soubor je vytvořen ve složce, z níž byl program spuštěn. Poslední uživatelskou možností je vymazání příchozích dat a vyčištění grafů. K tomuto dochází také vždy při přechodu programu do režimu ON-LINE.

Minimální nároky aplikace na PC nejsou určeny. Program nevyžaduje instalaci. Velikost programu je 33kB. Jedná se o spustitelný soubor s názvem balancingROBOT.exe. Obrázek z prostředí programu balancingROBOT je k nalezení v kapitole 11.1 Identifikace systému.

9.3 Výstupní soubor programu balancingROBOT

Výstupem programu je soubor balancingROBOT_data.txt. Tento soubor je vytvořen po stisknutí tlačítka Save v adresáři programu a obsahuje všechna data spojená s regulačním

pochodem naformátovaná tak, aby byly lehce využitelné v prostředí MATLAB. Vzor výstupních dat:

Data from Balancing ROBOT v.2 saved : 27.3.2013 14:25:35

Time	W	Y	U
0.0000	0.0000	-2.2000	37.5595
0.0100	0.0000	-1.4500	29.2168
0.0200	0.0000	-0.9500	23.5863

Textový soubor obsahuje hlavičku s popisem vyjadřujícím výstup z programu balancingROBOT v.2, datum a čas vytvoření souboru. Následuje popis jednotlivých uložených veličin, kterými jsou:

- Time (časová osa),
- W (požadovaný náklon) – požadovaná hodnota,
- Y (aktuální náklon) – výstupní veličina,
- U (úhlová rychlost otáčení kol) – akční zásah.

Odovídající data tvoří sloupce oddělené TAB. Desetinná čísla jsou vyjádřena desetinou tečkou. Data lze díky těmto dvěma specifiky lehce přesunout do workspace prostředí programu MATLAB.

9.4 Komunikace modelu a PC

Vzájemná komunikace modelu a PC je realizována sériovým rozhraním RS232. Rozhraní RS232 bylo využito z důvodu podpory obou propojovaných komponent (PC a mikrokontroler), dostatečné rychlosti a v neposlední řadě z důvodu své jednoduchosti nasazení. Komunikace probíhá rychlostí $R = 115200\text{bit/s}$, jež byla vybrána na základě výpočtu zajišťujícího schopnost modelu odeslat potřebná data ve směru komunikace ROBOT→PC s periodou 10ms.

$$R \geq \frac{D}{\Delta t} \quad [\text{bit/s}] \quad (17)$$

$$115200 \geq \frac{13 \cdot 8}{0,01}$$

kde D je délka rámce podle kapitoly 9.4.1 Přenos dat ROBOT→PC [*bit*],

Δt perioda odesílání dat [s].

9.4.1 Přenos dat ROBOT→PC

Robot po své inicializaci posílá na sériovou linku pakety dat s periodou 10ms nesoucí informace o svém statusu a data regulačního pochodu. Tyto pakety jsou na straně PC předávány ovládacímu programu `balancingROBOT`. Paket dat je uzpůsoben tak aby byl schopen bezpečně ale zároveň bez velkého režijního zatížení přenášet data přes popsanou sériovou linku. Má tudíž tři synchronizační bajty a následně přesně danou strukturu posloupnosti bajtů zajišťující konzistentnost dat. Přijatá data jsou na straně ovládacího programu načtena, je provedena synchronizace, po níž jsou sestavena potřebná data.

0	1	2	3	4	5	6
synch_1	synch_1	synch_2	status	time_2	time_1	time_0
7	8	9	10	11	12	
Y_high	Y_low	U_high	U_low	Batt_high	Batt_low	

Tab. 3 – Datový paket ROBOT→PC.

Pokud v průběhu chodu dojde k situaci, že není úspěšně provedena synchronizace (nejsou na začátku každého paketu přijaty všechny tři synchronizační bajty), je zbytek paketu zahozen a ovládací program čeká na další sadu synchronizačních bajtů. Jelikož jsou některé přenášené veličiny měřeny v jednotkách s desetinnými místy, jsou přes komunikační kanál přenášeny v nižších jednotkách. Po tomto převedení je přenášena pouze reálná část čísla nesoucího informaci. Tímto způsobem sice dochází ke ztrátě přesnosti, ale ta je i tak pro tuto aplikaci dostatečná. Tabulka Tab. 4 shrnuje jednotlivá přenášená data.

Označení	Význam	Rozsah	Rozlišení
Time	Čas	0 až 16777s	10ms
Y	Výstupní veličina URO	-90 až 90 °	1/60° = 1´
U	Akční zásah URO	-900 až 900 °/s	1°/s
Batt	Napětí baterie	0 až 13V	0,001V

Tab. 4 – Přenášená data ROBOT→PC.

9.4.2 Přenos dat PC→ ROBOT

V tomto směru komunikace je uvažováno se dvěma přenášenými typy informace. V případě, že je robot v režimu READY, jsou přenášeny parametry implementovaného regulačního algoritmu, které jsou nastavovány z PC, a v režimu ON-LINE je přenášena požadovaná hodnota náklonu robota, jež umožňuje jízdu robota.

Model dvoukolového robota má v řídicí elektronice programově implementován řídicí algoritmus, jehož parametry je možno nastavovat. V tomto směru přenosu dat není kladen nárok na výpočtovou a časovou náročnost, proto bylo více dbáno na větší rozsah a rozlišení přenášené informace. Byla proto navržena struktura 4 bajtů vyjadřující přenášený parametr. Díky tomuto bylo možno docílit žádané vyšší přesnosti, je totiž uvažováno, že parametr může být uživatelem zadán v okruhu reálných čísel.

3	2	1	0
Celá část čísla		Reálná část čísla	
Parametr_high	Parametr_low	Parametr_high	Parametr_low

Tab. 5 – Struktura přenášeného parametru.

Díky tomuto je přes sériovou linku možno přenášet parametr v rozsahu 32768,9999 až - 32767,9999 s rozlišením 0,0001. V aplikaci je uvažován obecný lineární regulátor čtvrtého řádu čitatele i jmenovatele, celkem je tedy nutno přenést 9 parametru regulátoru a také vzorkovací periodu, jež je v rozsahu 10 až 10000ms vyjádřená dvěma bajty. Celkem je tedy v tomto směru komunikace přenášeno 38 bajtů. Tato komunikace nemá synchronizační bajty, data je nutno odesílat až po připojení robota což zaručuje, že první přijatý bajt na straně robota je prvním přenášeným bajtem komunikace. Komunikace však není odolná vůči rušení, případně výpadku komunikace v průběhu přenosu. Tento fakt by však při správném užívání modelu neměl nastat. Správné přijetí dat je signalizováno současným rozsvícením LED 3 a 4 po dobu 3s. V případě, že k této signalizaci nedojde, je zapotřebí model robota resetovat.

V režimu ON-LINE je, jak již bylo napsáno, přenášena požadovaná hodnota náklonu modelu robota, nastavitelná je v prostředí balancingROBOT. Tato hodnota je přenášena jako jeden bajt s rozlišením 1°. Velikostí náklonu modelu robota lze ovlivňovat jeho rychlost jízdy.

10 MĚŘENÍ NÁKLONU

Jak již bylo popsáno v teoretické části práce, je možné měřit orientaci tělesa v prostoru pomocí několika principů a těm určených elektronických součástek. Skutečnost, že každý princip měření má své výhody a nevýhody vedla k osazení dvou typů součástek – gyroskopu a akcelerometru. Měření se pak opírá o jejich vzájemnou kombinaci, využívající klady obou součástek.

Aplikace vyžaduje měření orientace pouze v jedné ose – náklon od kolmice k podložce, dále tedy bude uvažováno o měření orientace v jedné ose.

10.1 Gyroskop

Gyroskop je schopen podávat informace o aktuální úhlové rychlosti. Informace o úhlu – náklonu modelu robota je dosaženo sumací vzorků úhlové rychlosti, měřených s přesně danou frekvencí (100Hz). Zavedením sumace vzorků úhlové rychlosti je však dosaženo i sumace chyby měření úhlové rychlosti. Zdroje chyby měření jsou dva. Prvním je samotný gyroskop, u něhož se projevuje posun nulové úrovně výstupního signálu, závislost měření na teplotě a nelinearita převodníku úhlové rychlosti na výstupní signál. Druhým zdrojem chyby měření je A/D převodník mikrokontroleru, jež převádí napět'ový signál z gyroskopu na digitální informaci. Výsledkem sumace těchto chyb měření je růst měřeného úhlu φ o cca. $0.2^\circ/s$, v klidovém stavu gyroskopu (výsledek praktického měření).

Měření úhlu pomocí gyroskopu je přírůstkové měření, na začátku měření je tedy zapotřebí znát aktuální – výchozí polohu. Výpočet úhlu náklonu gyroskopu φ_{GYRO} je naprogramován podle vztahu:

$$\varphi_{GYRO}(k) = \varphi(k-1) + GYRO_X \cdot S_{ADC_GYRO} \cdot T \quad [^\circ] \quad (18)$$

kde $\varphi(k-1)$ je náklon modelu robota vypočtený v minulé periodě měření $[^\circ]$,

$GYRO_X$ data z A/D převodníku $[digit]$,

S_{ADC_GYRO} výsledná citlivost A/D převodníku a gyroskopu $\left[\frac{^\circ/s}{digit} \right]$,

Δt perioda měření $[s]$.

Výsledná citlivost S_{ADC_GYRO} A/D převodníku mikrokontroleru a gyroskopu je vypočtena podle vztahu:

$$S_{ADC_GYRO} = S_{ADC} \cdot S_{GYRO} \left[\frac{^{\circ}/s}{digit} \right] \quad (19)$$

$$S_{ADC_GYRO} = 8,0566 \cdot 10^{-4} \cdot 1492 = 1,202 \frac{^{\circ}/s}{digit}$$

kde S_{ADC} je citlivost A/D převodníku mikrokontroleru $\left[\frac{V}{digit} \right]$,

S_{GYRO} citlivost gyroskopu (udávaná výrobcem) $\left[\frac{^{\circ}/s}{V} \right]$.

Citlivost S_{ADC} A/D převodníku mikrokontroleru je vypočtena podle vztahu:

$$S_{ADC} = \frac{U_{ADC}}{2^n} \left[\frac{V}{digit} \right] \quad (20)$$

$$S_{ADC} = \frac{3,3}{2^{12}} = 8,0566 \cdot 10^{-4} \frac{V}{digit}$$

kde U_{ADC} je napájecí napětí A/D převodníku mikrokontroleru [V],

n počet bitů převodníku [].

10.2 Akcelerometr

Měření orientace v prostoru pomocí akcelerometru je založeno na měření rozložení gravitační síly mezi měřené osy. Úhel výslednice těchto sil pak určuje měřený úhel φ . Chyba měření u tohoto principu měření nastává v případě, že se ke složkám rozložené gravitační síly přičte síla, která vzniká translačním pohybem. V takovém případě již úhel výslednice sil neodpovídá měřenému úhlu φ . Výhodou akcelerometru je absolutní způsob měření. Data, která jsou načítána přes rozhraní I2C s frekvencí 100Hz vždy nesou informaci o aktuálním rozložení gravitační síly do jednotlivých os a po přepočtu informaci o orientaci akcelerometru v prostoru.

Výpočet úhlu náklonu akcelerometru φ_{ACC} je realizován podle vztahu:

$$\varphi_{ACC} = - \left(\tan^{-1} \left(\frac{ACC_Y}{ACC_Z} \right) \cdot \frac{180}{\pi} \right) \quad [^\circ] \quad (21)$$

kde ACC_Y jsou naměřená data v ose Y [*digit*],
 ACC_Z naměřená data v ose Z [*digit*].

10.3 Rušení ovlivňující správné měření náklonu

Nežádoucími vlivy na měření úhlu náklonu φ modelu dvoukolého robota jsou dva. Prvním z nich je sám pohyb robota, při pohybu robota vznikají translační síly, které, jak již bylo napsáno, velmi negativně ovlivňují měření náklonu pomocí akcelerometru. Tento zdroj rušení však nejde eliminovat a při měření s ním musí být uvažováno. Druhým nepříznivým vlivem jsou vibrace. Konkrétně vibrace vznikající použitými krokovými motorky. V tomto případě však došlo k jejich úspěšné eliminaci zavedením microsteppingu, popsaného v kapitole 4.2 Microstepping.

10.4 Kombinace gyroskopu a akcelerometru

Snahou kombinace gyroskopu a akcelerometru je získat z obou způsobů měření jejich výhody a docílit co možná nejlepší informace o aktuálním náklonu modelu dvoukolého robota. Gyroskop je tedy využit pro svou schopnost měřit úhel náklonu modelu φ , bez vlivu translačních sil vznikajících pohybem modelu. Data akcelerometru jsou využita pro získání informace o náklonu modelu robota při spuštění aplikace a následně pro potlačení chyby měření gyroskopu vznikající sumací chyb měření. Praktickým měřením byl zjištěn nejlepší poměr úhlu měřeného gyroskopem a akcelerometrem podle vztahu:

$$\varphi = 0,995\varphi_{GYRO} \cdot 0,005\varphi_{ACC} \quad [^\circ] \quad (22)$$

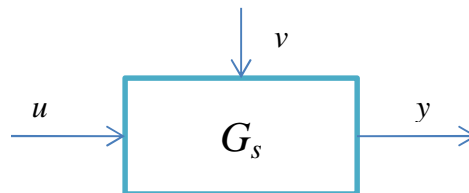
kde φ_{GYRO} je úhel náklonu měřený gyroskopem [$^\circ$],
 φ_{ACC} úhel náklonu měřený akcelerometrem [$^\circ$].

11 IDENTIFIKACE A REGULACE SYSTÉMU

Pro tuto kapitolu je zaveden pojem regulovaný systém, který představuje model dvoukolového robota umístěný v gravitačním poli Země. Systém je reprezentován vstupně – výstupním popisem – přenosem druhého řádu $G_s(z)$.

$$G_s(z) = \frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{b_1 z + b_0}{z^2 + a_1 z + a_0} = \frac{b(z)}{a(z)} \quad (23)$$

Vstupem tohoto systému je akční zásah u – úhlová rychlost krokových motorů, jehož velikost je generována regulátorem a výstupem y pak náklon od rovnovážné polohy. Porucha v je uvažována na výstupu systému v podobě změny náklonu od rovnovážné polohy vzniklé působením vnější síly.

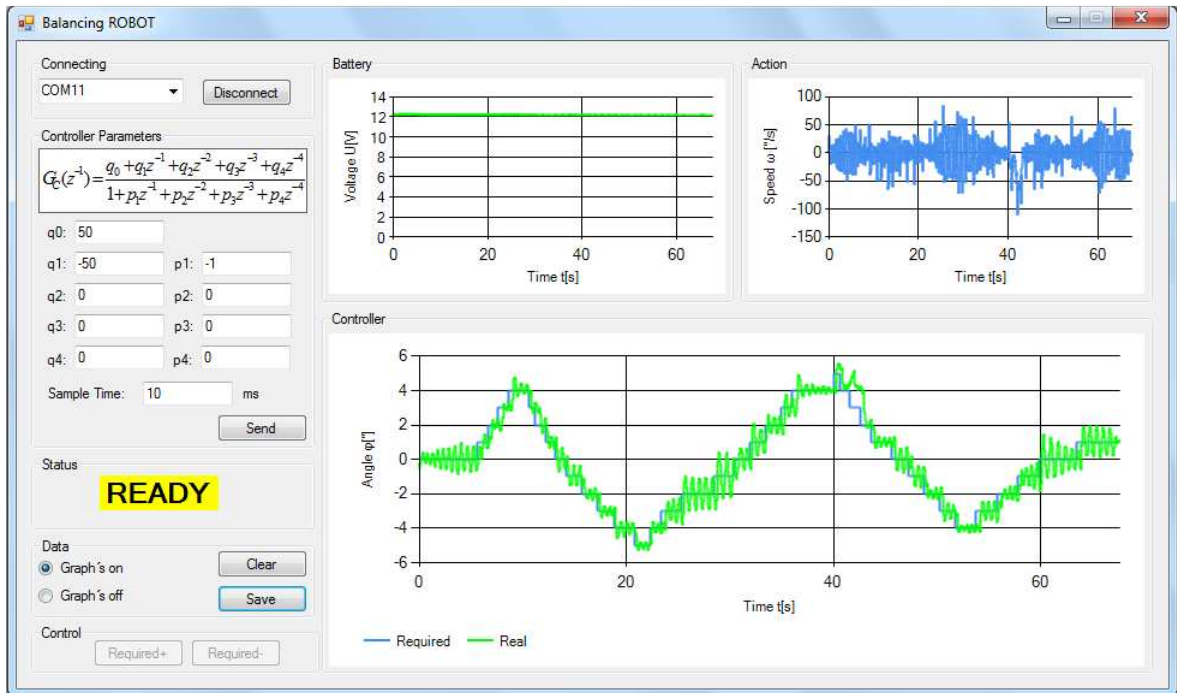


Obr. 21 – Přenos regulovaného systému.

11.1 Identifikace systému

Identifikace systému byla provedena experimentálně pomocí pěti měření. Pro každé měření byly nastaveny parametry regulátoru v podobě proporcionálního regulátoru tak, aby došlo ke kmitání modelu okolo rovnovážné polohy. Perioda regulace byla nastavena na $\Delta t = 10\text{ms}$. Měření bylo prováděno s průběžnou změnou požadované hodnoty náklonu w v modelu prostřednictvím ovládacího programu balancingROBOT. Program umožňuje měnit požadovanou hodnotu se skokem 1° . Naměřená data – N akčních zásahů a výstupů systému, získaná z výstupního souboru ovládacího programu. Tato data byla vyhodnocena v prostředí MATLAB metodou nejmenších čtverců, která je popsána v teoretické části. Grafické zobrazení umístění pólů a nul systémů nalezených z jednotlivých měření jsou shrnuty v Příloze V. Přenosy systémů jsou velmi podobné a podle očekávání obsahují jeden pól, který se nalézá za hranicí stability. Lze tedy konstatovat, že systém – dvoukolový robot je opravdu nestabilní.

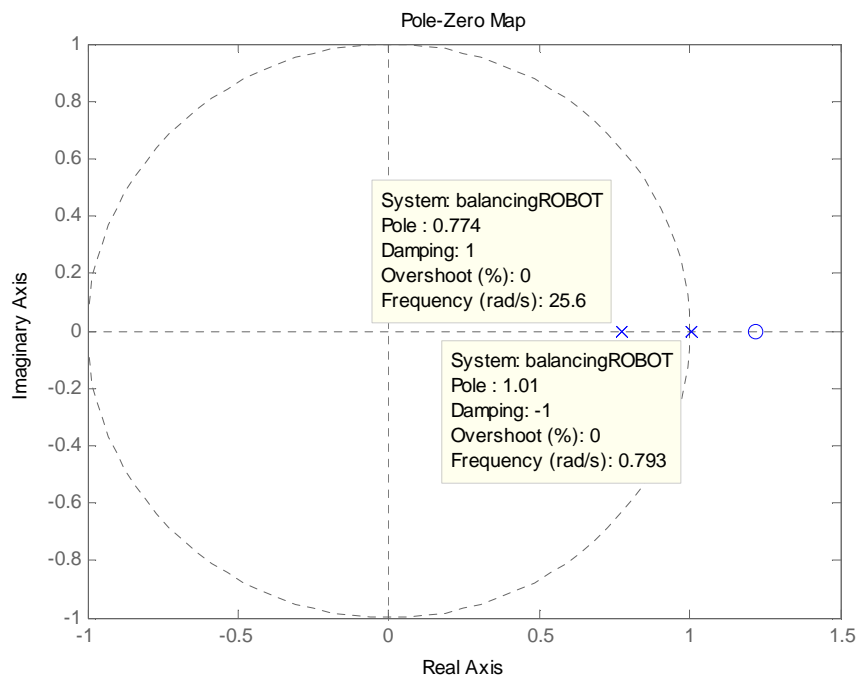
Průběh měření pomocí programu balancingROBOT, s nastaveným PSD regulátorem $P = 50$, je zobrazen na obrázku níže (Obr. 22).



Obr. 22 – Průběh identifikace systému v prostředí balancingROBOT.

Jeden z nalezených přenosů systému a tomu odpovídající přenos (24) se zobrazením umístění pólů a nul systému na obrázku Obr. 23. Stablní oblast je v komplexní rovině vytyčena jednotkou kružnicí.

$$G_s(z) = \frac{-5,674 \cdot 10^{-4} z + 6,923 \cdot 10^{-4}}{z^2 - 1,782z + 0,7802} \quad T = 0,01s \quad (24)$$

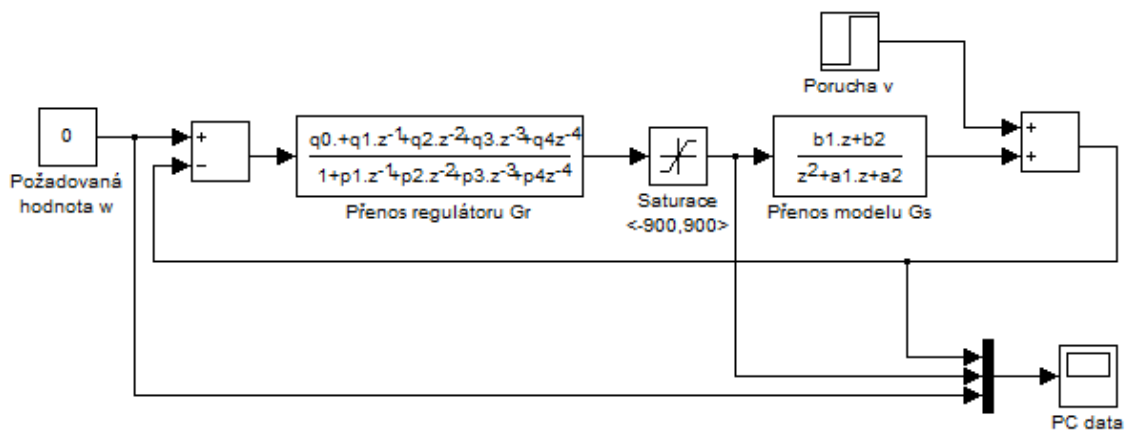


Obr. 23 – Umístění pólů a nul systému.

11.2 Regulační algoritmus

Mikrokontroler osazený na elektronické desce má programově implementovaný regulační algoritmus SISO 1DOF uzavřeného regulačního obvodu s obecným lineárním regulátorem čtvrtého řádu, jehož parametry jsou nastavovány ovládacím programem balancingROBOT.

Výchozí požadovanou hodnotou je $\varphi = 0^\circ$, jež představuje podle geometrického schématu na obrázku (Obr. 10) rovnovážnou stabilní polohu robota. Tuto hodnotu lze měnit pomocí ovládacího programu balancingROBOT a umožňovat tak jízdu robota. Odečetm reálného náklonu modelu robota φ , jež je v záporné zpětné vazbě, je získána regulační odchylka. Regulační odchylka je vstupem naprogramovaného řídicího algoritmu obecného lineárního regulátoru. Vypočtený akční zásah, představující úhlovou rychlost kol $\omega[^\circ]$ je omezen saturací na $-900^\circ/\text{s}$ a $+900^\circ/\text{s}$. Toto omezení je dáno maximální rychlostí otáčení krokových motorů při napájecím napětí 10V. S tímto omezením by tedy mělo být při návrhu parametrů řídicího algoritmu uvažováno. Algoritmus je naprogramován tak, aby omezil vliv wind – up efektu. Vypočtený akční zásah mimo rozsah je omezen a v další periodě regulace je počítáno s akčním zásahem omezeným.



Obr. 24 – SISO 1DOF regulační obvod.

11.3 Návrh regulátoru

Návrh regulátoru vychází z identifikovaných parametrů regulovaného systému $G_s(z)$. O systému bylo rozhodnuto jako o nestabilním. Úlohou regulátoru by tak mělo být nejenom asymptotické sledování požadované hodnoty w a kompenzace poruchy v ale také stabilizace regulovaného systému. Doplnčkovým požadavkem je průběh akčního zásahu s ohledem na jeho omezení velikosti v rozsahu $\langle -900, 900 \rangle^\circ/\text{s}$.

Uzavřený regulační obvod bude stabilní v případě, že bude stabilní charakteristický polynom přenosu řízení. Tohoto lze dosáhnout polynomiální metodou návrhu s umístěním pólů charakteristické rovnice ve stabilní oblasti. Tato metoda navíc umožňuje záměrným umístěním pólů, pomocí zavedení ladícího parametru α , ovlivňovat reakci akčního zásahu, což koresponduje s potřebou udržovat průběh velikosti akčního zásahu v povoleném rozsahu.

Regulovaný systém s identifikovanými parametry metodou nejmenších čtverců:

$$G_s(z) = \frac{b(z)}{a(z)} = \frac{b_1 z + b_0}{a_2 z^2 + a_1 z + a_0} = \frac{-5,674 \cdot 10^{-4} z + 6,923 \cdot 10^{-4}}{z^2 - 1,782 z + 0,7802} \quad T = 0.01s \quad (25)$$

Regulátor je uvažován PSD se zpožďovacím členem ve tvaru:

$$G_r(z) = \frac{q(z)}{p(z)} = \frac{q_2 z^2 + q_1 z + q_0}{(z-1)(z+p_0)} = \frac{q_2 z^2 + q_1 z + q_0}{z^2 + (p_0 - 1)z - p_0} \quad (26)$$

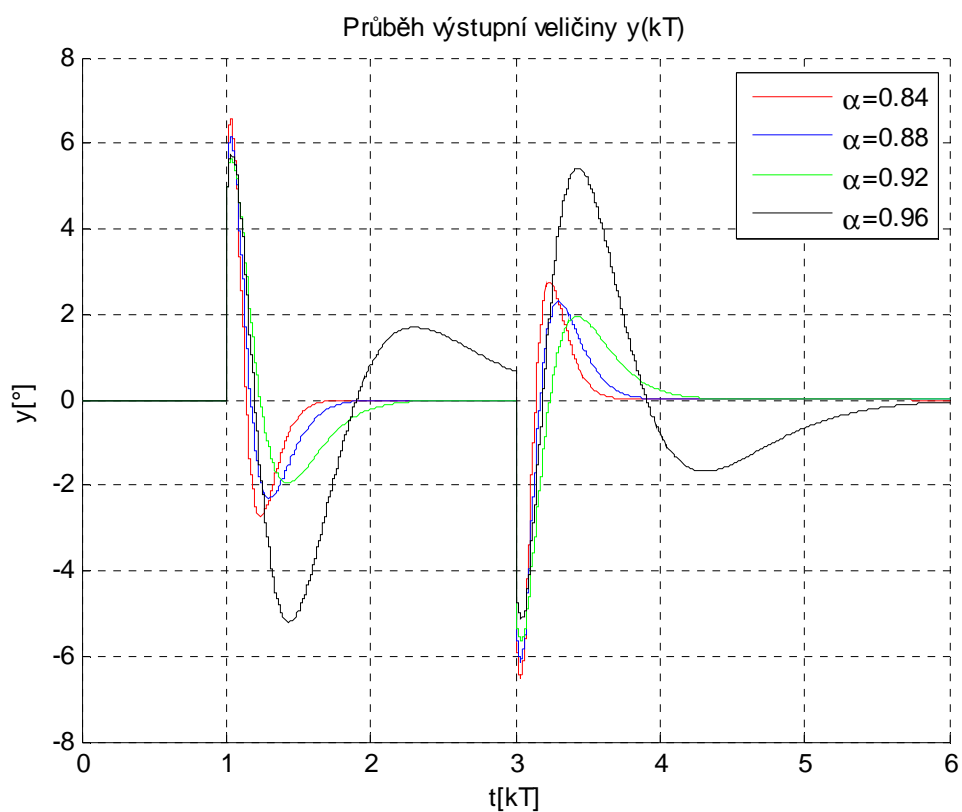
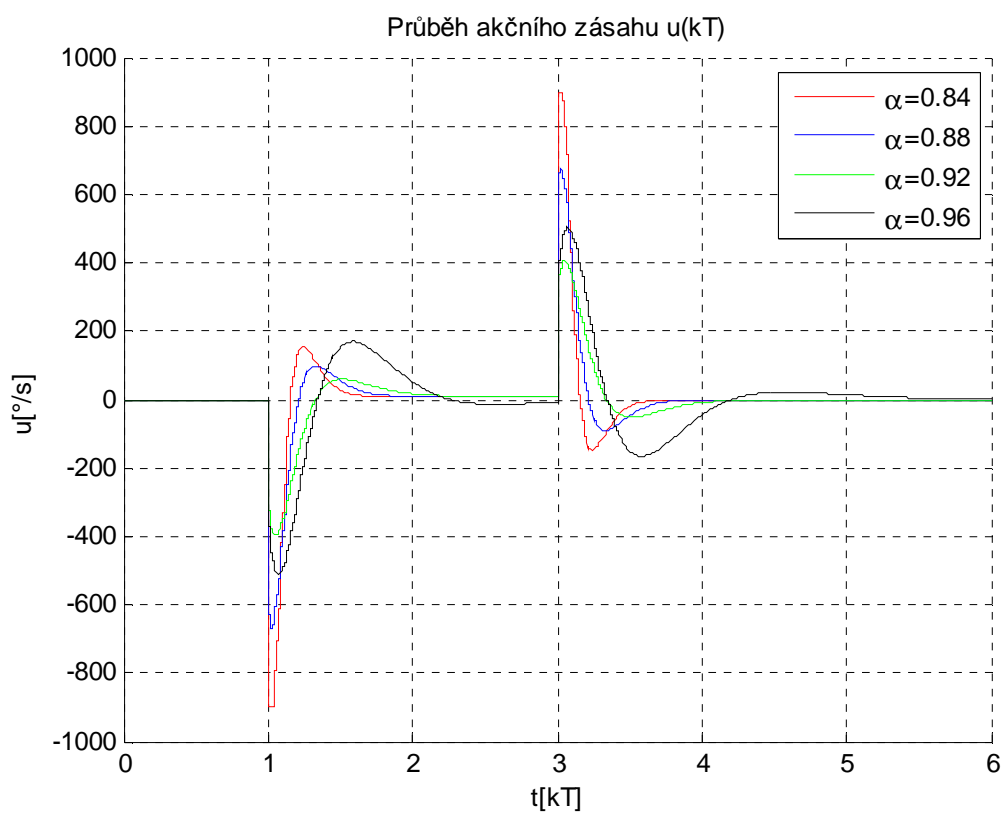
Charakteristický polynom přenosu řízení:

$$a(z)p(z) + b(z)q(z) = d(z) \quad (27)$$

Neznámé parametry na levé straně rovnice jsou čtyři. Řešením polynomiální rovnice porovnáním parametrů u jednotlivých mocnin, vznikají čtyři rovnice o čtyřech neznámých. Řešení polynomiální rovnice bude jedno jednoznačné v případě, že stupeň polynomu $d(z)$ $\partial_d = 4$.

$$a(z)p(z) + b(z)q(z) = (z - \alpha)^4 \quad (28)$$

Parametr α představuje pól charakteristické rovnice přenosu řízení. Zápisem $(z - \alpha)^4$ je dosaženo požadovaného stupně polynomu $d(z)$ ∂_d a pól α se stává vícenásobným pólem. Umístěním pólu α na reálné ose v komplexní rovině stability v rozmezí (0,1) je zajištěna stabilita uzavřeného regulačního obvodu s tím, že jeho umístěním lze ovlivňovat reakci systému. Dosazením polynomů do rovnice (28) a jejím řešením jsou nalezeny parametry polynomů $q(z)$ a $p(z)$ regulátoru $G_r(z)$ (26). Výpočty byly realizovány, stejně jako identifikace parametrů přenosu regulovaného systému v prostředí MATLAB.


 Obr. 25 – Průběh výstupní veličiny $y(kT)$ pro různé α .

 Obr. 26 - Průběh akčního zásahu $u(kT)$ pro různé α .

Parametr α byl nastaven, jak již bylo napsáno, a ohledem na průběh regulačního pochodu. Průběh regulačního pochodu byl simulován pro chybu na výstupní veličině, v podobě impulzu o velikosti 5° a délce 2s. Tato chyba by měla představovat simulované vyvedení modelu robota z rovnovážné polohy krátkodobým působením vnější síly. Z výsledků simulace je patrné omezení akčního zásahu saturací v případě parametru $\alpha = 0,84$. Tento nedostatek odstraňuje posunutí parametru α na hodnotu $\alpha = 0,88$. Omezení akčního zásahu saturací je odstraněno avšak na úkor mírného prodloužení doby ustálení výstupní veličiny. Prodloužení doby ustálení výstupní veličiny je patrné i v dalších krocích nastavení parametru α , zde je však prodlužování doby ustálení výstupní veličiny nežádoucí.

Vypočtený přenos regulátoru pro parametr $\alpha = 0,88$:

$$G_r(z) = \frac{q(z)}{p(z)} = \frac{125,7631z^2 - 218,2196z + 93,3241}{z^2 - 1,6503z + 0,6503} \quad T = 0,01s \quad (29)$$

Tento regulátor je naprogramován v režimu STAY-AWAY modelu robota a jako výchozí regulátor v režimu ON-LINE.

11.4 Práce s modelem

Práce s modelem je velmi jednoduchá. Model se připojuje zásuvným konektorem typu BEC ke tříčlánkové Li-Pol baterii se jmenovitým napětím 11,1V a konektorem na DPS označeným CON3 k PC, s využitím kabelu sériové komunikace RS232, jež je možno opatřit převodníkem RS232 \rightarrow USB. Připojení modelu k baterii je indikováno zelenou diodou LED1 s následující signalizací inicializace modelu krátkým bliknutím všech signalizačních LED diod. Po jejich zhasnutí je model připraven. V případě, že signalizační LED nezhasnou, inicializace se nezdařila a je zapotřebí resetovat model odpojením od baterie.

Ovládací program balancingROBOT je zapotřebí připojit na příslušný sériový port nalezený v menu aktivních sériových portů. Po úspěšném připojení je zobrazen status modelu READY. Status READY umožňuje zadávat parametry regulátoru. Po jejich zadání jsou do modelu robota odeslána stisknutím tlačítka Send. Potvrzení správného přijetí signalizuje robot 3s bliknutím signalizačních diod LED3 a LED4. Spuštění chodu modelu probíhá stisknutím ovládacího tlačítka umístěného na řídicí elektronice, označeného jako SW1. Po jeho stisknutí se model uvede do stavu ON-LINE, ve kterém probíhá regulace s uživatelem nastavenými parametry v prostředí balancingROBOT. V průběhu chodu

modelu jsou do prostředí ovládacího programu odesílány průběhy veličin uzavřeného regulačního obvodu a průběh napětí baterie. Průběhy jsou zobrazovány v příslušných grafech. Napětí baterie pod 8V je signalizováno červeným vykreslením průběhu napětí na baterii a rozsvícením červené signalizační LED2. V případě, že tento jev nastane, je zapotřebí ukončit měření a baterii nabít.

Průběh náklonu modelu robota je zobrazován v okně Controller spolu s požadovanou hodnotou náklonu. Překročení náklonu $\varphi \geq \pm 20^\circ$ je signalizováno červeným vybarvením průběhu. Překročení náklonu $\varphi \geq \pm 45^\circ$ znamená automatický přechod modelu do stavu READY s okamžitým zastavením chodu motorů. Tím je předcházeno možnosti nekontrolovaného pohybu robota.

Měření je ukončeno opětovným stiskem tlačítka SW1. Naměřená data je možno uložit tlačítkem Save do textového souboru balancingROBOT_data.txt, jež bude vytvořen v adresáři, z něhož je program spuštěn.

Tlačítko SW2 slouží ke spuštění modelu v režimu STAY AWAY. Tento režim nastavuje parametry regulátoru do výchozích hodnot vypočtených v kapitole 11.3 Návrh regulátoru. S těmito parametry regulátoru je model schopen setrvávat ve stabilním stavu. Režim STAY AWAY je navržen pro pohodlnou práci s modelem. Uživatel může provádět identifikaci modelu, návrh regulátoru, případně jiné aktivity, během nichž bude model schopen „stát opodál“ a čekat na další měření.

Model je schopen pracovat i autonomně bez připojení k PC programu balancingROBOT.

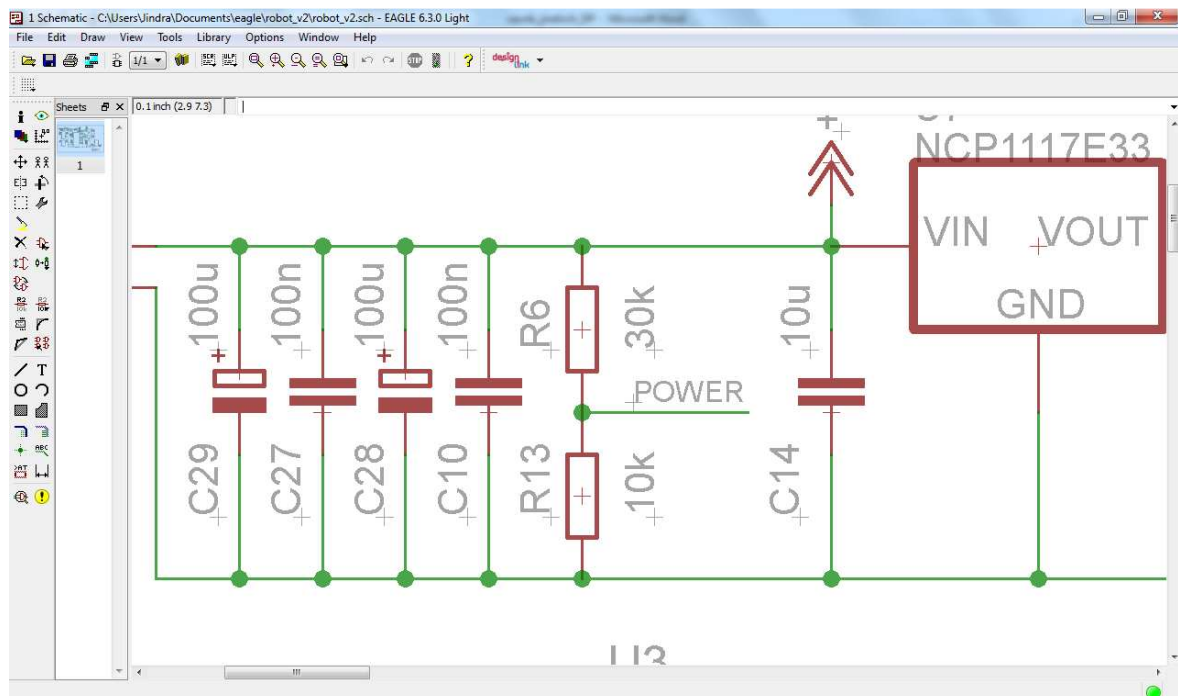
12 VÝVOJOVÉ PROSTŘEDKY

Pro vytvoření modelu bylo využito několika vývojových prostředí umožňujících postupné vytvoření celého modelu. Tyto programy byly vybírány tak, aby byly volně dostupné a ekonomická stránka projektu se tak nezatěžovala pořizováním drahého software. Obecně lze říci, že každý vývojový prostředek, jehož licence je placená, má svůj ekvivalent mezi prostředky volně šiřitelnými, případně lze daný prostředek získat v rámci jistých omezení nebo pro studijní účely. Takto získaný software však nesmí být využit pro komerční účely.

V podkapitolách níže je uvedený veškerý software použitý při výrobě modelu včetně popisku použití, specifikací a možností získání konkrétního software. Jednotlivé kapitoly jsou doplněny print - screeny příslušného vývojového prostředí.

12.1 Návrh elektroniky modelu

Nástrojem pro vytvoření elektronické desky se stal Eagle 6.3.0 Light. Tato aplikace umožňuje vytváření elektronických schémát zapojení a také vytváření DPS včetně generování podkladů pro jejich výrobu. Software je volně šiřitelný pro studijní účely právě ve verzi Light. Omezeními jsou velikost vytvořeného DPS a počet vrstev vodivých spojů.



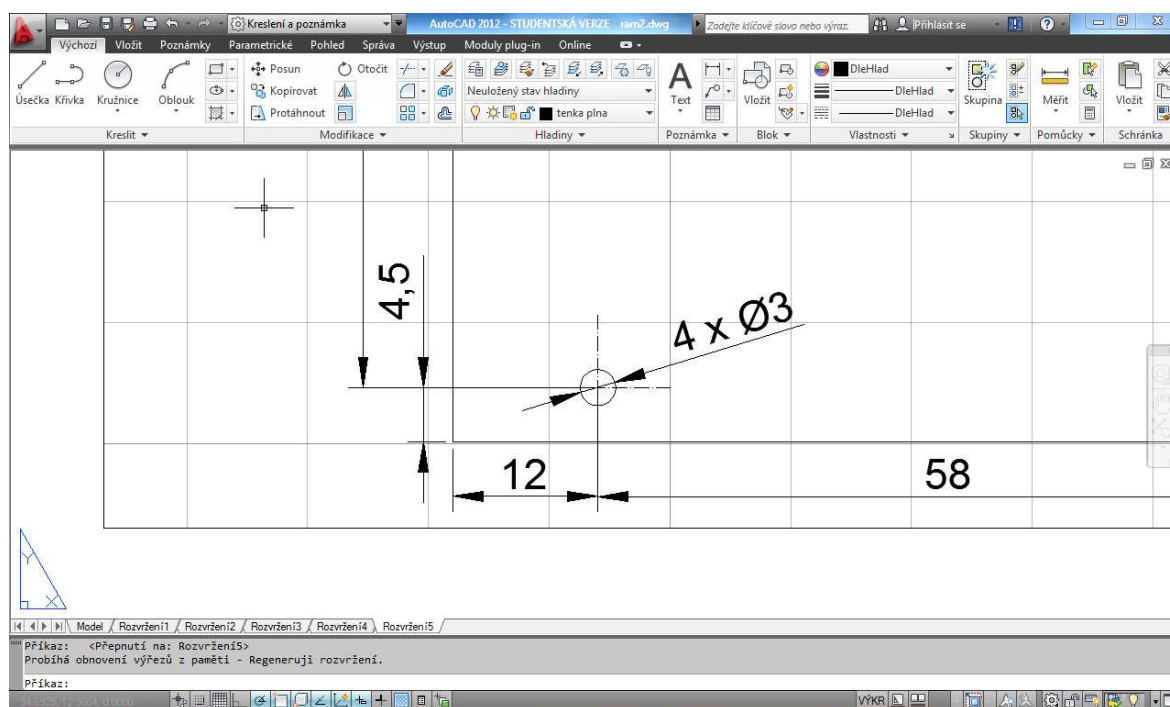
Obr. 27 – Prostředí Eagle 6.3.0.

Základem programu je databáze součástek, jež obsahuje jak základní elektronické prvky jako pasivní elektronické součástky tak nejrůznější konektory, integrované obvody atd.

Přestože je databáze součástek již v základu velmi bohatá, zdaleka nepokrývá vše, co lze na trhu elektronických součástek nalézt. Eagle však umožňuje jednoduše elektronické součástky vytvářet a základní knihovnu součástek těmito rozšiřovat.

12.2 Návrh konstrukce

Pro vytvoření návrhu byl využit program AutoCAD 2012, jež umožňuje vytváření kompletní výkresové dokumentace. Autodesk, výrobce programu, poskytuje své produkty v rámci Education programu pro studijní účely zdarma. Program je po registraci na stránkách www.students.autodesk.com k dispozici bez funkčních omezení, pouze s nápisem „Vytvořeno ve výukovém produktu Autodesk“ generovaným při tisku vytvořené výkresové dokumentace.



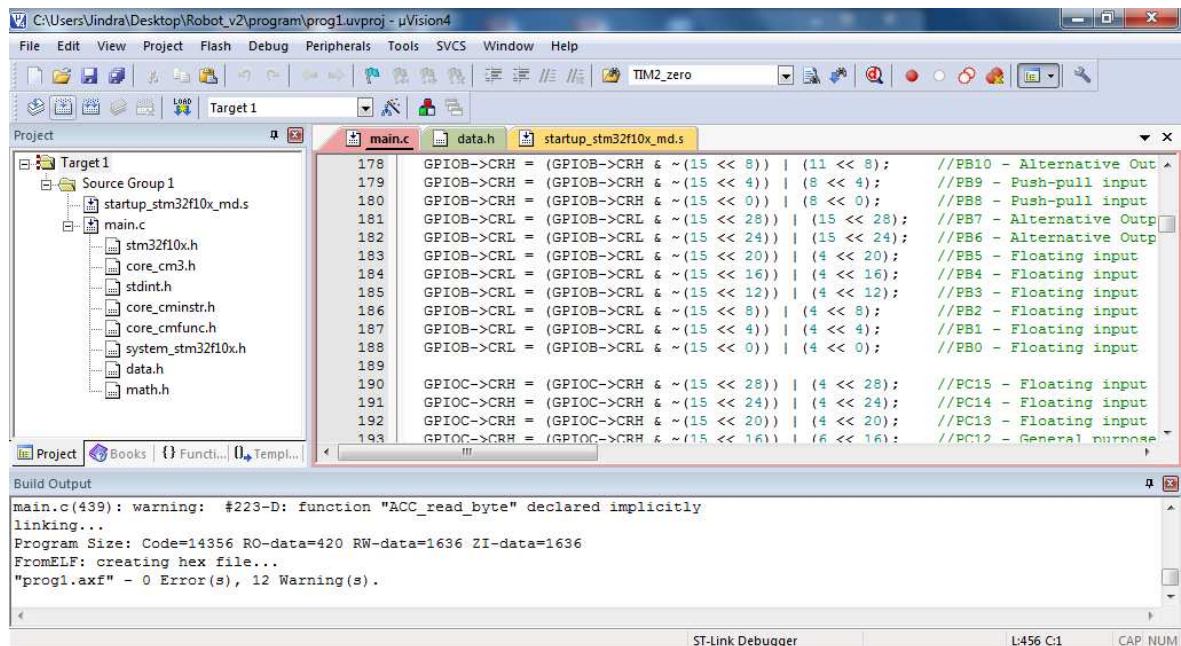
Obr. 28 – Prostředí AutoCAD 2012.

12.3 Programování mikrokontroleru

Pro mikrokontroler řady ARM s jádrem Cortex – M3 je na trhu k dispozici celá řada programovacích prostředí, mezi něž patří například IAR Systems, TrueSTUDIO, TASKING a uVISION. Obecně každé vývojové prostředí má své klady a zápory, své světlé a stinné stránky, nejinak je tomu v tomto případě. Výběrem pro tuto aplikaci se však stal uVISION ve verzi 4 od firmy KEIL. Velmi uživatelsky příjemné prostředí této aplikace spolu s podporou mnoha programovacích zařízení, včetně použitého ST-Link/V2,

byly při samotném výběru těmi pomyslnými jazýčky na vahách. Prostředí uVISION je možné po bezplatné registraci stáhnout z domovských stránek výrobce www.keil.com. Licence je omezena maximální velikostí výstupního souboru 32kB.

Prostředí uVISION umožňuje vytváření programů v assembleru, jazyku C a také C++, podpora mikrokontrolerů různých výrobců je samozřejmostí.



```

178  GPIOB->CRH = (GPIOB->CRH & ~(15 << 8)) | (11 << 8); //PB10 - Alternative Out
179  GPIOB->CRH = (GPIOB->CRH & ~(15 << 4)) | (8 << 4); //PB9 - Push-pull input
180  GPIOB->CRH = (GPIOB->CRH & ~(15 << 0)) | (8 << 0); //PB8 - Push-pull input
181  GPIOB->CRL = (GPIOB->CRL & ~(15 << 28)) | (15 << 28); //PB7 - Alternative Outp
182  GPIOB->CRL = (GPIOB->CRL & ~(15 << 24)) | (15 << 24); //PB6 - Alternative Outp
183  GPIOB->CRL = (GPIOB->CRL & ~(15 << 20)) | (4 << 20); //PB5 - Floating input
184  GPIOB->CRL = (GPIOB->CRL & ~(15 << 16)) | (4 << 16); //PB4 - Floating input
185  GPIOB->CRL = (GPIOB->CRL & ~(15 << 12)) | (4 << 12); //PB3 - Floating input
186  GPIOB->CRL = (GPIOB->CRL & ~(15 << 8)) | (4 << 8); //PB2 - Floating input
187  GPIOB->CRL = (GPIOB->CRL & ~(15 << 4)) | (4 << 4); //PB1 - Floating input
188  GPIOB->CRL = (GPIOB->CRL & ~(15 << 0)) | (4 << 0); //PB0 - Floating input
189
190  GPIOC->CRH = (GPIOC->CRH & ~(15 << 28)) | (4 << 28); //PC15 - Floating input
191  GPIOC->CRH = (GPIOC->CRH & ~(15 << 24)) | (4 << 24); //PC14 - Floating input
192  GPIOC->CRH = (GPIOC->CRH & ~(15 << 20)) | (4 << 20); //PC13 - Floating input
193  GPIOC->CRH = (GPIOC->CRH & ~(15 << 16)) | (6 << 16); //PC12 - General purpose
194  }

```

```

Build Output
main.c(439): warning: #223-D: function "ACC_read_byte" declared implicitly
linking...
Program Size: Code=14356 RO-data=420 RW-data=1636 ZI-data=1636
FromELF: creating hex file...
"prog1.axf" - 0 Error(s), 12 Warning(s).

```

Obr. 29 – Prostředí uVISION.

Obrázek níže (Obr. 30) dokumentuje použitý programátor ST-Link/V2. Na obrázku jsou znázorněny konektory A – mikrokontrolery STM32 rozhraní JTAG a SWD, B – mikrokontrolery STM8 rozhraní SWIM a konečně D - signalizační LED dioda.

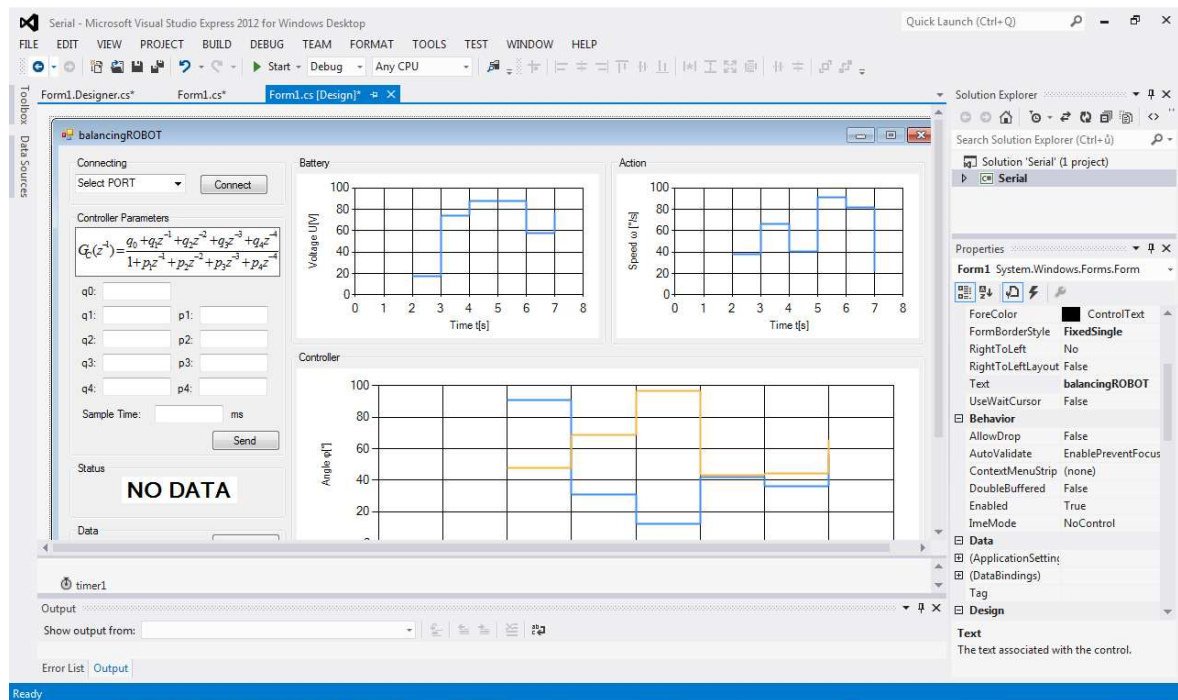


Obr. 30 - ST-Link/V2. [14]

12.4 Programování obslužného programu balancingROBOT

Součástí modelu je obslužný program pro ovládání modelu pomocí PC. Cílem tohoto programu je umožnit sledování průběhů vybraných veličin a stavu modelu (vstupní informace) a možnost zadávat parametry naprogramovaného obecného lineárního regulátoru a měnit hodnotu požadovaného náklonu (výstupní informace).

Využitým programovacím prostředím je VisualStudio Express 2012 for Windows Desktop (dále jen VS). VS umožňuje vytváření spustitelných aplikací pro operační systém Windows s rozhraním Framework 4.5. Prostředí VS umožňuje vytváření aplikací v jazycích Basic, C# a C++. Samotný program je napsán v jazyce C#. VisualStudio Express 2012 je po registraci na stránkách výrobce www.microsoft.com/visualstudio/ volně stažitelné prostředí.



Obr. 31 – Prostředí VisualStudio Express 2012 for Windows Desktop.

ZÁVĚR

Výsledkem práce je funkční výuková pomůcka předmětů zabývajících se identifikací systému a návrhem parametrů regulátoru v podobě modelu dvoukolového balancujícího robota. Vytvořená výuková pomůcka se skládá ze dvou částí. První částí je samotný model, druhou pak ovládací program pro PC nazvaný balancingROBOT.

Model robota je ve své požadované poloze nestabilní, a to z důvodu umístění těžiště nad osou otáčení kol. Pro stabilizaci modelu v této poloze byl model vybaven řídicí elektronikou s dostatečným výpočetním výkonem, potřebnou sensorikou, výkonovou elektronikou a komunikačními rozhraními. Programově byl vybaven obecným lineárním regulátorem, který dotvořil zamýšlený 1DOF regulační obvod sestávající z onoho regulátoru a regulovaného systému – modelu nestabilního robota. Tento regulační obvod byl pomyslně zabalen do systému, díky kterému se s celým regulačním odvodem dá jednoduše pracovat – identifikovat regulovaný systém, zadat parametry obecného lineárního regulátoru a provést měření. Tento systém se skládá z ovládacího programu balancingROBOT, jeho komunikace s modelem a vazeb na regulační obvod.

Regulovaný systém byl identifikován druhým řádem přenosu $G_s(z)$ (24) se vzorkovací periodou $T = 0,01s$. Analýzou tohoto přenosu bylo potvrzeno, že se jedná o nestabilní systém díky jednomu pólu systému za hranicí stabilního systému. Stability modelu bylo dosaženo návrhem parametrů PSD regulátoru se zpoždovacím členem metodou umístění pólů charakteristické rovnice přenosu řízení s výsledným přenosem $G_r(z)$ (29). Simulačně i měřením byla ověřena stabilita uzavřeného regulačního obvodu, s kompenzací poruchy na výstupní veličině a asymptotickým sledováním požadované hodnoty, jejíž změna vede k pohybu robota vpřed a vzad. Navržený regulátor byl využit jako výchozí regulátor aplikace.

Úkolem pro uživatele – studenta, by nyní mělo být minimálně napodobení dosažených výsledků regulace, lépe však navržení regulátoru podle představ a požadavků studenta. Díky koncepci modelu je práce s ním jednoduchá a snad i zajímavá. Možností identifikace systému a návrhu regulátoru je opravdu mnoho. Model je připraven, stačí pustit se do práce.

ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ

The result of this thesis is a functional learning tool for courses dealing with identification of a controlled plant and design of a controller for this plant. The created learning tool consists of two parts. The first part is the model of two-wheeled balancing robot, the second is a control program for PC called balancingROBOT.

The model of the robot is in its required position unstable, because the location of the center of gravity is above the axis of rotation of the wheels. To stabilize the model in this position, the model was equipped with control electronics with enough computing power, necessary sensor technology, power electronics and communication interfaces. Programmatically the model was equipped with general linear regulator, which completed the planned 1DOF control loop consisting of this controller and the controlled system – the model of unstable robot. This control loop was imaginary packed into the system, thanks to which the whole control loop can be simply manipulated - identify the controlled system, enter the parameters of the linear regulator and make measurements. This system consists of a control program balancingROBOT, its communication with the model and linkages with control loop.

Regulated system was identified by second order transfer function $G_s(z)$ (24) with the sampling period $T = 0,01s$. Analysis of the system confirmed, that it is an unstable system with one pole of the system behind the border for stable systems. Stability of the model was achieved by designing the parameters of a PSD controller with delay element. The parameters were calculated using method of the pole placement of the characteristic equation of control loop transfer function, resulting is $G_r(z)$ (29). By simulation and measurement the stability of closed control loop with compensation of disturbances on the output variable and asymptotic tracking of the required values was verified. Changes of the required values result is movement of the robot forward and backward. The designed controller was used as the default controller for the model of balancing robot.

The task for the user - the student - should be at least to imitate the control results obtained with the default controller described in this thesis, or even better, to design a new controller according to the student's ideas and requirements. Thanks to its design, the model is easy to work with and hopefully interesting. Possibilities for system identification and controller design are wide. The model is ready; students can start working.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Compatibility Test. *Segway* [online]. 2013 [cit. 2013-05-21]. Dostupné z: <http://www.segway.com/compatibility/>
- [2] Balancing Robot Kit. *Balduino* [online]. 2013 [cit. 2013-05-21]. Dostupné z: www.balduino.net
- [3] *Balancing Robot NBot* [online]. 2013 [cit. 2013-05-21]. Dostupné z: <http://www.geology.smu.edu/~dpa-www/robo/nbot/>
- [4] ARM. In: *Wikipedia* [online]. 2013 [cit. 2013-05-21]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/ARM>
- [5] MEMS Accelerometers, Gyroscopes, & Geomagnetic Sensors – Propelling Disruptive Consumer Applications. *Digi-Key* [online]. 2013 [cit. 2013-05-21]. Dostupné z: <http://www.digikey.com/us/en/techzone/sensors/resources/articles/MEMS-Accelerometers.html>
- [6] BOBÁL, Vladimír. *Identifikace systémů*. Vyd. 1. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2009, 128 s. ISBN 9788073188887.
- [7] DOSTÁL, Petr a Radek MATUŠŮ. *Stavová a algebraická teorie řízení*. Vyd. 1. Ve Zlíně: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2010, 90 s. ISBN 9788073189914.
- [8] *RM0008 Reference manual: STM32F101xx, STM32F102xx, STM32F103xx, STM32F105xx and STM32F107xx advanced ARM-based 32-bit MCUs*. Švýcarsko, 2011. Dostupné z: http://www.st.com/web-ui/static/active/en/resource/technical/document/reference_manual/CD00171190.pdf
- [9] *STM32F103x8 STM32F103xB: Medium-density performance line ARM-based 32-bit MCU with 64 or 128 KB Flash, USB, CAN, 7 timers, 2 ADCs, 9 com. interfaces*. Švýcarsko, 2012. Dostupné z: <http://www.st.com/web-ui/static/active/en/resource/technical/document/datasheet/CD00161566.pdf>
- [10] *MMA8452Q: Xtrinsic MMA8452Q 3-Axis, 12-bit/8-bit Digital Accelerometer*. USA, 2013. Dostupné z: http://www.freescale.com/files/sensors/doc/data_sheet/MMA8452Q.pdf
- [11] *LPR4150AL: MEMS motion sensor: dual-axis pitch and roll ±1500 dps analog gyroscope*. Švýcarsko, 2009. Dostupné z: <http://www.st.com/web-ui/static/active/en/resource/technical/document/datasheet/CD00254134.pdf>

- [12] L6205: *DMOS DUAL FULL BRIDGE DRIVER*. Švýcarsko, 2003. Dostupné z: <http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/datasheet/CD00002345.pdf>
- [13] RN42. *Roving Networks* [online]. 2013 [cit. 2013-05-21]. Dostupné z: <http://www.rovingnetworks.com/products/RN42>
- [14] ST-LINK/V2: *ST-LINK/V2 in-circuit debugger/programmer for STM8 and STM32*. Švýcarsko, 2012. Dostupné z: http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/data_brief/DM00027105.pdf
- [15] BALÁTĚ, Jaroslav. *Automatické řízení*. 2., přeprac. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2004, 663 s. ISBN 8073001489.
- [16] PROKOP, Roman, Radek MATUŠŮ a Zdenka PROKOPOVÁ. *Teorie automatického řízení: lineární spojité dynamické systémy*. Vyd. 1. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2006, 102 s. ISBN 8073183692.
- [17] NOVÁK, Petr. *Mobilní roboty: pohony, senzory, řízení*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005, 243 s. ISBN 8073001411.
- [18] MANN, Burkhard. *C pro mikrokontroléry: ANSI-C, kompilátory C, spojovací programy - linkery, práce s ATMEL AVR a MSC-51, příklady programování v jazyce C, nástroje programování, tipy a triky*,-. 1. české vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2003, 279 s. ISBN 8073000776.
- [19] PINKER, Jiří. *Mikroprocesory a mikropočítače*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2004, 159 s. ISBN 8073001101.
- [20] ŠOLC, František. *Robotika, modelování a řízení robotů: robotics, modelling and control of robots : teze přednášky ke jmenování profesorem*. Brno: VUTIUM, 2004. 28 s. ISBN 8021426187.
- [21] ÚŘEDNÍČEK, Zdeněk. *Robotika* [online]. Zlín: Univerzita Tomáše Bati, 2012 [cit. 2013-05-21]. ISBN 978-80-7454-223-7. Dostupné z: <http://dspace.k.utb.cz/>.
- [22] NAVRÁTIL, Pavel. *Automatizace: vybrané statě*. Vyd. 1. Ve Zlíně: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2011, 289 s. ISBN 9788073189358.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

A/D	Analog - Digital převodník
APB	Advanced Peripheral Bus
CAN	Controller Area Network
CPU	Central Processing Unit
DC	Direct Current
DMOS	Double-Diffused Metal-Oxide Semiconductor
DOF	Degree of Freedom
DPS	Deska Plošných Spojů
DSP	Digital Signal Processor
EXTI	External Interrupt
GPIO	General Purpose Input/Output
IIC	Inter-Integrated Circuit
JTAG	Joint Test Action Group
LED	Light-Emitting Diode
Li-Pol	Lithium-Polymer
MCU	Micro Controller Unit
MEMS	Micro-Electro-Mechanical System
PC	Personal Computer
PLL	Phase-Locked Loop
SPI	Serial Peripheral Interface
SRAM	Static Random Access Memory
SWD	Serial Wire Debug
TIM	Timer
UART	Universal Asynchronous Receiver and Transmitter

URO Uzavřený Regulační Obvod

USB Universal Serial Bus

VS Visual Studio

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 – Segway. [1]	12
Obr. 2 – Balanduino. [2]	13
Obr. 3 – nBOT Rev.4. [3]	14
Obr. 4 – Podvozek robota nBOT. [3].....	14
Obr. 5 – Struktura jedno osého gyroskopu. [5].....	18
Obr. 6 – Obdélníkový budící signál krokového motoru.	20
Obr. 7 – Funkce sinus budícího proudu microsteppingu.....	21
Obr. 8 – Schématické znázornění objektu. [6, s. 30]	23
Obr. 9 – 1DOF konfigurace systému řízení. [7, s. 22].....	27
Obr. 10 – Schématický model robota.	30
Obr. 11 - Dvoukolý nestabilní robot.....	31
Obr. 12 – Blokové schéma řídicí elektroniky + periférii.....	32
Obr. 13 – DPS robota, horní a spodní strana.	32
Obr. 14 – Blokové schéma mikrokontroleru. [9, s. 11]	34
Obr. 15 – Zapojení vývodů pouzdra LQFP64 [9, s. 24]	34
Obr. 16 – Působení gravitační síly na akcelerometr	35
Obr. 17 – Blokové schéma akcelerometru. [10, s. 3].....	36
Obr. 18 – Blokové schéma gyroskopu. [11, s. 3].....	37
Obr. 19 – Blokové schéma vnitřního zapojení L6205. [12, s. 1].....	39
Obr. 20 – Bluetooth komunikační modul RN-42. [13].....	40
Obr. 21 – Přenos regulovaného systému	50
Obr. 22 – Průběh identifikace systému v prostředí balancingROBOT.....	51
Obr. 23 – Umístění pólů a nul systému.	51
Obr. 24 – SISO 1DOF regulační obvod.....	52
Obr. 25 – Průběh výstupní veličiny $y(kT)$ pro různé α	54
Obr. 26 - Průběh akčního zásahu $u(kT)$ pro různé α	54
Obr. 27 – Prostředí Eagle 6.3.0.....	57
Obr. 28 – Prostředí AutoCAD 2012.	58
Obr. 29 – Prostředí uVISION.	59
Obr. 30 - ST-Link/V2. [14].....	59
Obr. 31 – Prostředí VisualStudio Express 2012 for Windows Desktop.....	60

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 – Registr AFIO_MAPR. [8, s. 172].....	33
Tab. 2 – Pravdivostní tabulka vstupů L6205. [12, s. 8].....	38
Tab. 3 – Datový paket ROBOT→PC.	45
Tab. 4 – Přenášená data ROBOT→PC.....	45
Tab. 5 – Struktura přenášeného parametru.	46

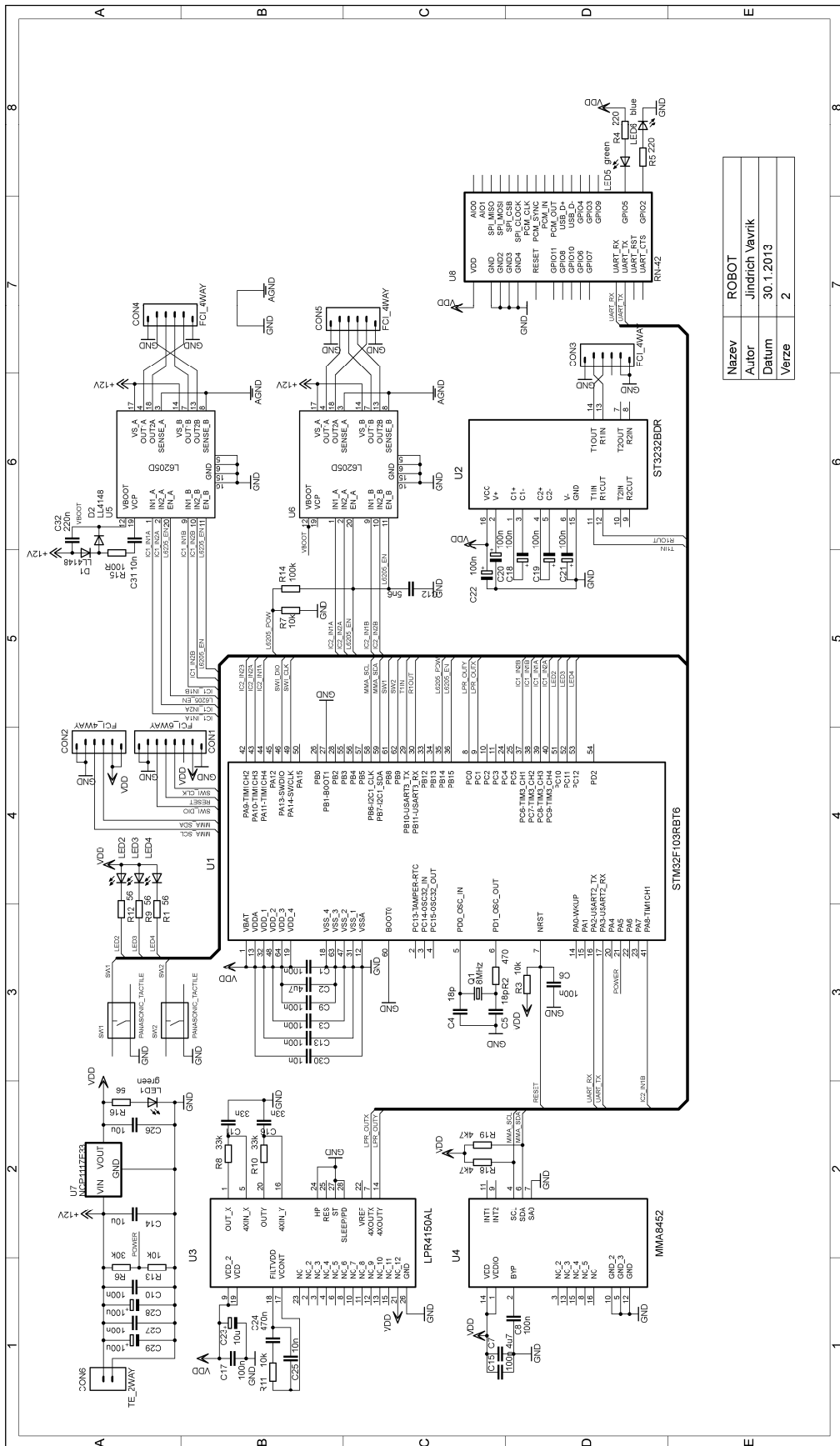
SEZNAM PŘÍLOH

- PI Schéma zapojení desky plošných spojů.
- PII Deska plošných spojů – v měřítku.
- PIII Výkresová dokumentace šasi.
- PIV Soupiska elektronických součástek.
- PV Identifikace systému.

SEZNAM ELEKTRONICKÝCH PŘÍLOH

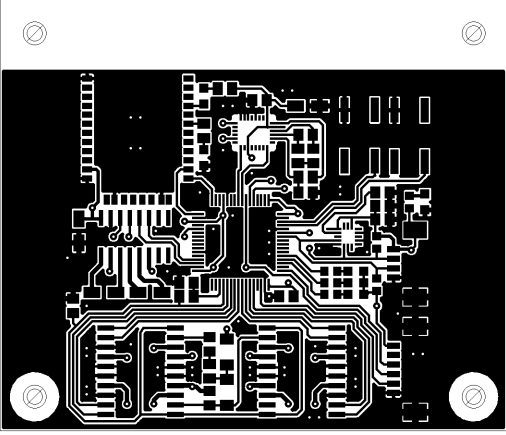
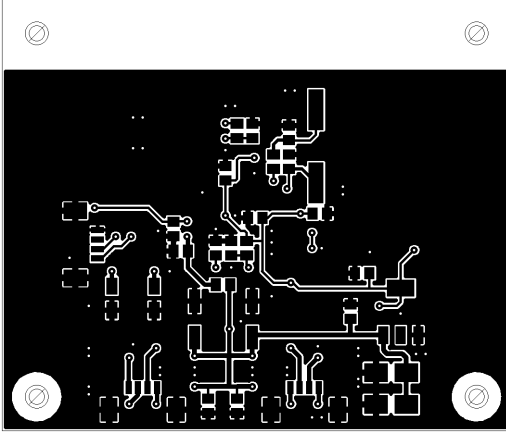
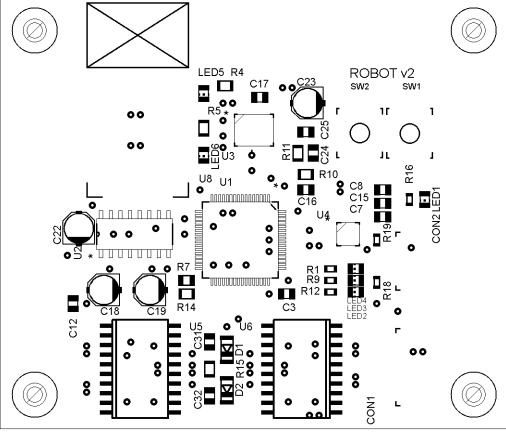
- PVI Schéma zapojení DPS (Eagle).
- PVII Návrh DPS (Eagle).
- PVIII Zdrojový kód mikrokontroleru (uVISION).
- PIX Program balancingROBOT (spustitelný soubor).
- PX Zdrojové soubory programu balancingROBOT (Visual Studio).
- PXI Identifikace systému (MATLAB).
- PXII Metoda umístění pólů (MATLAB).
- PXIII Video ukázka.

PŘÍLOHA PI: SCHÉMA ZAPOJENÍ DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ



Nazev	ROBOT
Autor	Jindrich Vavrik
Datum	30.1.2013
Verze	2

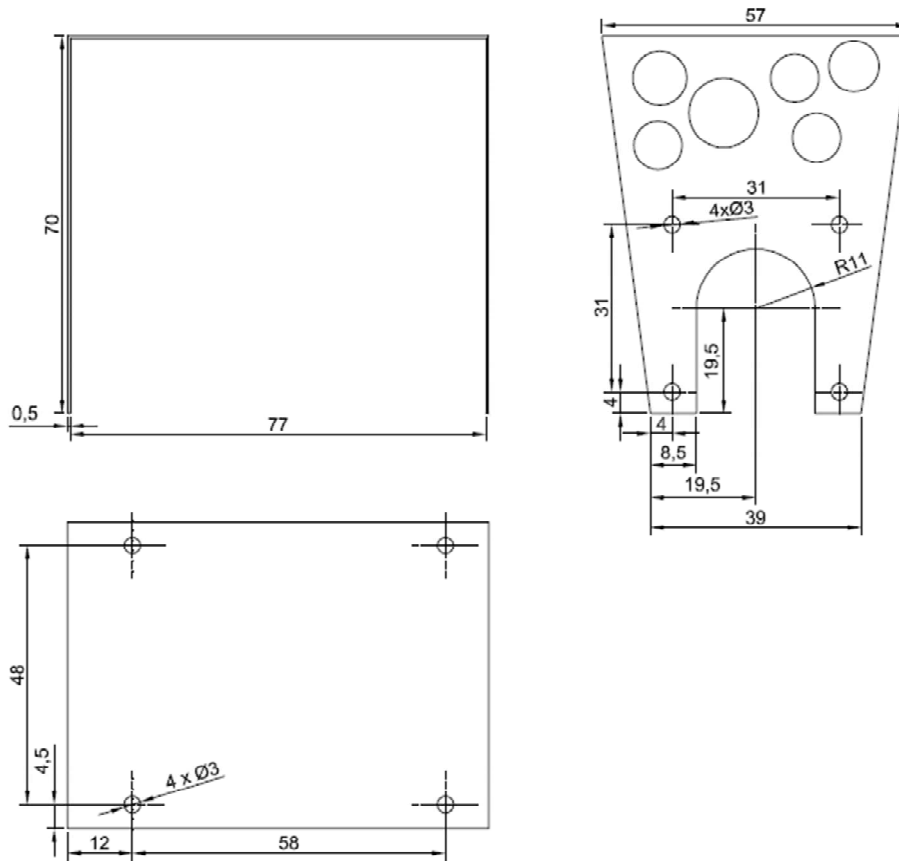
PŘÍLOHA P II: DESKA PLOŠNÝCH SPOJŮ – V MĚŘÍTKU

HORNÍ STRANA	SPODNÍ STRANA
Vrstva spojů	
	
Vrstva součástek + Servisní potisk	
	

PŘÍLOHA P III: VÝKRESOVÁ DOKUMENTACE ŠASI

VYTVORENO VE VYUKOVÉM PRODUKTU SPOLEČNOSTI AUTODESK

VYTVORENO VE VYUKOVÉM PRODUKTU SPOLEČNOSTI AUTODESK



VYTVORENO VE VYUKOVÉM PRODUKTU SPOLEČNOSTI AUTODESK

VYTVORENO VE VYUKOVÉM PRODUKTU SPOLEČNOSTI AUTODESK

PŘÍLOHA P IV: SOUPLSKA ELEKTRONICKÝCH SOUČÁSTEK

Označení	Popis	Typ (výrobce)	Pouzdro
C1	Kondenzátor	100n	C0805
C2		4u7	C0805
C3		100n	C0805
C4		18p	C0805
C5		18p	C0805
C6		100n	C0805
C7		4u7	C0805
C8		100n	C0805
C9		100n	C0805
C10		100n	C0805
C11		33n	C0805
C12		5n6	C0805
C13		100n	C0805
C14		10u	C0805
C15		100n	C0805
C16		33n	C0805
C17		100n	C0805
C18		100n	PANASONIC_B
C19		100n	PANASONIC_B
C20		100n	PANASONIC_B
C21		100n	PANASONIC_B
C22		100n	PANASONIC_B
C23		10u	PANASONIC_B
C24		470n	C0805
C25		10n	C0805
C26		10u	C0805
C27		100n	C0805
C28		100u	PANASONIC_D
C29		100u	PANASONIC_D
C30		10n	C0805
C31		10n	C0805
C32		220n	C0805
CON1	Konektor	6 - pólů(FCI)	
CON2		4 - póly(FCI)	
CON3		4 - póly(FCI)	
CON4		4 - póly(FCI)	
CON5		4 - póly(FCI)	
CON6		2 - póly(FCI)	
D1	Dioda	LL4148(Vishay)	SOD80C
D2		LL4148(Vishay)	SOD80C
LED1	LED dioda	2012SGC-green(KB)	LED0805

LED2	LED dioda	2012EC-red(KB)	LED0806
LED3		2012SGC-green(KB)	LED0807
LED4		2012SGC-green(KB)	LED0808
LED5		2012SGC-green(KB)	LED0809
LED6		2012QBC-D-blue(KB)	LED0810
Q1	Krystal	8MHz(Vishay)	HC49UP
R1	Rezistor	56	R0603
R2		470	M0805
R3		10k	M0805
R4		220	M0805
R5		220	M0805
R6		30k	M0805
R7		10k	R0805
R8		33k	M0805
R9		56	R0603
R10		33k	M0805
R11		10k	M0805
R12		56	R0603
R13		10k	M0805
R14		100k	M0805
R15		100R	M0805
R16		56	R0603
R18		4k7	R0603
R19		4k7	R0603
SW1		Spínač	EVQQ2D01W(Panasonic)
SW2	EVQQ2D01W(Panasonic)		SPST
U1	Mikrokontroler	STM32F103RBT6(STM)	QFP50P1200X1200X160-64N
U2	RS232 převodník	ST3232BDR(STM)	SOIC127P600X175-16N
U3	Gyroskop	LPR4150AL(STM)	LGA28R50P8X6_500X400X100
U4	Akcelerometr	MMA8452(Freescale)	QFN50P300X300X100-16N
U5	H-můstky	L6205D(STM)	SO20
U6		L6205D(STM)	SO20
U7	LDO	NCP1117ST33(OnSemi)	SOT-223
U8	Bluetooth	RN42-I/RM(Microchip)	

PŘÍLOHA P V: IDENTIFIKACE SYSTÉMU

