



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky, informatiky
a mezioborových studií ■

INVERZNÍ KYVADLO

Diplomová práce

Studijní program: N2612 – Elektrotechnika a informatika
Studijní obor: 3902T005 – Automatické řízení a inženýrská informatika
Autor práce: **Bc. Michal Třešňák**
Vedoucí práce: Ing. Lukáš Hubka, Ph.D.





TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC
Faculty of Mechatronics, Informatics
and Interdisciplinary Studies ■

INVERTED PENDULUM

Diploma thesis

Study programme: N2612 – Electrical Engineering and Informatics
Study branch: 3902T005 – Automatic Control and Applied Computer Science
Author: **Bc. Michal Třešňák**
Supervisor: Ing. Lukáš Hubka, Ph.D.



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Michal Třešňák**
Osobní číslo: **M13000213**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Automatické řízení a inženýrská informatika**
Název tématu: **Inverzní kyvadlo**
Zadávací katedra: **Ústav mechatroniky a technické informatiky**

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

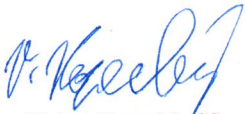
1. Zrealizujte mechanickou a elektrickou část úlohy "Inverzní kyvadlo" a ověřte funkčnost.
2. Proveďte teoretickou analýzu systému - vytvořte simulační model.
3. Diskutujte možné konfigurace systému a řešené úkoly při využití jako laboratorní úloha. Diskutujte též možná rozšíření systému.
4. Pro konfiguraci "Inverzní kyvadlo" navrhňte a pokuste se i otestovat vhodný algoritmus řízení systému.

Rozsah grafických prací: dle potřeby dokumentace
Rozsah pracovní zprávy: cca 40–50 stran
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:


- [1] MODRLÁK, Osvald a Lukáš HUBKA. Automatické řízení: učební text. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2012.
- [2] SULTAN Khalil a Ashab MIRZA, Inverted Pendulum. Analysis, Design and Implementation. Sheffield, UK. [online]. 2014 [cit. 2015-09-10]. Dostupné z: [http://www.engr.usask.ca/classes/EE/480/Inverted Pendulum.pdf](http://www.engr.usask.ca/classes/EE/480/Inverted%20Pendulum.pdf)
- [3] Stabilization of an inverted pendulum using a printer. YouTube [online]. 2010 [cit. 2015-09-10]. Dostupné z: <http://www.youtube.com/watch?v=gn6jr09K1xs>
- [4] DIY control of Inverted Pendulum on Carriage. YouTube [online]. 2010 [cit. 2015-09-10]. Dostupné z: http://www.youtube.com/watch?v=ET9iNasf_eE
- [5] Inverted pendulum. Etekciki.info [online]. 2012 [cit. 2015-09-10]. Dostupné z: <http://www.eteksciki.info/videos/inverted+pendulum>

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Lukáš Hubka, Ph.D.**
Ústav mechatroniky a technické informatiky

Datum zadání diplomové práce: **10. října 2015**
Termín odevzdání diplomové práce: **16. května 2016**


prof. Ing. Václav Kopecký, CSc.
děkan




doc. Ing. Milan Kolář, CSc.
vedoucí ústavu

V Liberci dne 10. října 2015

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum: 4.1.2016

Podpis: 

Abstrakt

Tato práce se zabývá návrhem a realizací úlohy inverzního kyvadla. Základem jeho fyzického provedení je pojezd z inkoustové tiskárny EPSON. Původní krokový motor byl jako pohon zachován. Bylo však potřeba navrhnout nové řízení pomocí vhodné elektroniky. Nedílnou součástí přípravku je tak i mikroprocesor a rozhraní, které komunikuje s jakoukoliv měřicí kartou s analogovými vstupy a výstupy v rozsahu 0-5V. Jako zpětná vazba slouží zpracovávaný signál z inkrementálního snímače, ke kterému je přimontováno samotné kyvadlo.

Pro přiblížení reálného systému byl použit model, který zahrnuje základní mechanické parametry kyvadla.

System má několik možností pohledu a způsobů řízení. V práci jsou probírány dvě nejzajímavější varianty, a to vyhoupenutí kyvadla a jeho balancování.

Klíčová slova

Inverzní kyvadlo, automatické řízení, balancování, vyhoupenutí, PID regulátor

Abstract

This thesis describes design and making of the inverted pendulum. The base of its physical form is the motion base of an inkjet printer EPSON. The origin stepper motor was the part of it. But, it was necessary to design a new electronic controller. One of the main parts is a microprocessor and an analog interface that provides signals in a range of 0-5V. An incremental sensor was used as a feedback of the position of the pendulum as an axe of rotation.

Part of this thesis is also a model of a pendulum and also a measured model of the motion base.

This system has several ways of control. This thesis includes two of them. The swing-up control, and balance control.

Keywords

Inverted pendulum, automatic control, balancing, swing-up, PID regulator

Obsah

1.	ÚVOD	8
2.	REALIZACE PŘÍPRAVKU.....	9
2.1	PŘÍPRAVA KONSTRUKCE	9
2.2	ZÁKLADNA	9
2.3	POHON	10
2.4	VÝKONOVÝ STUPEŇ	11
2.5	MIKROPROCESOR	12
2.6	ROZHRANÍ.....	13
2.6.1	VSTUPY	13
2.6.2	VÝSTUPY	13
2.7	SNÍMÁNÍ POLOHY	14
2.8	ELEKTRONIKA.....	15
2.8.1	GALVANICKÉ ODDĚLENÍ	15
2.8.2	NÁVRH DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ	16
2.9	STRUKTURA PROGRAMU	17
2.9.1	KOMUNIKACE S PERIFERIEMI	17
2.9.2	OBSLUHA PŘERUŠENÍ.....	17
2.9.3	HLAVNÍ PROGRAM.....	18
2.10	OVLÁDÁNÍ PŘES ANALOGOVÉ ROZHRANÍ	19
2.10.1	ANALOGOVÁ KARTA	19
2.10.2	ANALOGOVÉ VSTUPY A VÝSTUPY	19
3.	INVERZNÍ KYVADLO.....	21
3.1	IDENTIFIKACE SYSTÉMU	21
3.1.1	LAGRANGEOVY ROVNICE DRUHÉHO DRUHU	21
3.1.2	IDENTIFIKACE KYVADLA	23
3.1.3	IDENTIFIKACE VOZÍKU	26
3.1.1	MODEL KYVADLA NA POHYBLIVÉM VOZÍKU	27
3.2	MOŽNÉ KONFIGURACE SYSTÉMU.....	30
3.2.1	VYHOUPNUTÍ KYVADLA	30
3.2.2	BALANCOVÁNÍ KYVADLA V HORNÍ POLOZE	30
3.2.3	DOJEZD VOZÍKU BEZ PŘEKMITU KYVADLA	31
3.3	KYVADLO JAKO LABORATORNÍ ÚLOHA	32
3.4	ROZŠÍŘENÍ A VYLEPŠENÍ.....	33

3.4.1	POHON	33
3.4.2	ZPĚTNÁ VAZBA	33
3.4.3	TUHOST KONSTRUKCE	34
3.4.4	ROZŠÍŘENÍ POMOCÍ SBĚRNICE SPI.....	35
4.	ŘÍZENÍ	36
4.1	MOŽNOSTI ŘÍZENÍ.....	36
4.2	SIMULAČNÍ MODEL VOZÍKU S KYVADLEM.....	37
4.2.1	SIMULOVANÉ BALANCOVÁNÍ KYVADLA.....	37
4.3	REGULACE REÁLNÉHO SYSTÉMU	40
4.3.1	VYŠVIHNUTÍ KYVADLA	40
4.3.2	BALANCOVÁNÍ	42
4.3.3	VYHOUPNUTÍ A NÁSLEDNÉ BALANCOVÁNÍ.....	42
5.	ZÁVĚR	44

Seznam obrázků

Obrázek 1	- Původní podoba pojezdu	9
Obrázek 2	- Používaná zapojení krokových motorů.....	10
Obrázek 3	- Pohon s napínací pružinou řemenu.....	10
Obrázek 4	- Struktura procesoru PIC16F887	12
Obrázek 5	- Mechanické provedení snímače a upevnění kyvadla na jeho osu.....	14
Obrázek 6	- Schéma zapojení uvažovaného galvanického oddělení	15
Obrázek 7	- Návrh desky plošných spojů.....	16
Obrázek 8	- Měřicí karta NI USB-6008	19
Obrázek 9	- Schéma funkce DAQ.....	20
Obrázek 10	- Fyzikální kyvadlo	22
Obrázek 11	- Surová data pro vstup do identifikace	24
Obrázek 12	- Porovnání naměřených dat a simulace.....	24
Obrázek 13	- Model kyvadla	25
Obrázek 14	- Identifikace pohonu a vozíku	27
Obrázek 15	- Model kyvadla unášeného vozíkem.....	29
Obrázek 16	- Simulační model vozíku s kyvadlem.....	37
Obrázek 17	- Regulace výchylky a polohy simulovaného systému.....	38
Obrázek 18	- Graf z výstupu simulace	38
Obrázek 19	- Graf výstupu regulace vyšvihnutí kyvadla	41
Obrázek 20	- Graf výstupu regulace polohy kyvadla.....	41
Obrázek 21	- Regulace systému skutečného kyvadla.....	42

1. Úvod

V oboru automatického řízení se řeší i méně obvyklé úlohy, sloužící hlavně jako demonstrace síly oboru regulace. Jednou z těchto úloh je i inverzní kyvadlo. Jedná se o alternativu kyvadla klasického s hlavním rozdílem, že požadovaná poloha je opačná. Tím pádem se z něj stává systém, který je bez vnějšího zásahu nestabilní. Pro řešení úlohy v tomto případě bude uvažována pouze jedna rovina. Díky tomu stačí k řízení systému pouze jeden pohon a jeden údaj o natočení osy. Jako sekundární údaj bude sloužit i informace o poloze vozíku. Vzhledem k tomu, že pohonem je krokový motor, bude využita možnost získat pozici sumou jednotlivých kroků od počátku osy.

Motor samotný je poháněn pulzy generovanými navrženou řídicí elektronikou, která sestává z mikroprocesoru PIC a výkonového členu. Pro komunikaci s vnějším světem slouží A/D a D/A převodníky s vhodně zvolenou přesností, které jsou spojeny s řídicí jednotkou přes sériové rozhraní. Zadaný napěťový rozsah je 0-5V. Ten by měla podporovat široká škála měřicích karet.

Úloha je uzpůsobena tomu, aby ji bylo možné řídit více způsoby. Nabízí se jak řízení implementované přímo v ovládacím obvodu, tak již zmíněné analogové rozhraní. Díky rozšiřitelnosti sběrnice SPI, je možné do obvodu též přidat další prvek, který se na řízení může podílet.

Fyzikální realizace kyvadla umožňuje dokonce minimálně tři přístupy řízení, které lze aplikovat. Jedná se o konfigurace jako je zastavení bez překmitu, vyhoupenutí, anebo balancování kyvadla. Každá z těchto variant může vyžadovat různé typy regulace.

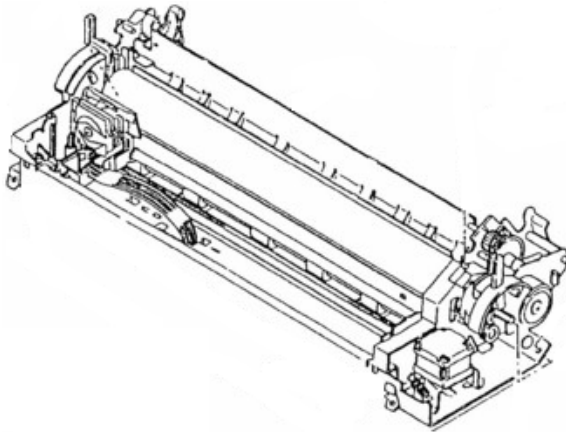
2. Realizace přípravku

2.1 Příprava konstrukce

Základem k manipulaci s kyvadlem v jedné rovině je potřeba použít pohon s lineárním vedením. V tomto případě ideálně posloužila původní pojezdová část inkoustové tiskárny. Výhodou tohoto řešení byla přítomnost původního krokového motoru.

2.2 Základna

K tomu, aby se dal pojezd využít, se muselo provést nespočetné množství úprav. Všechny přebytečné části byly odšroubovány nebo uříznuty. Výsledkem tak byla velice odlehčená konstrukce, která umožňuje neomezenou rotaci kyvadla. Rozšířila se i možná dráha pojezdu.

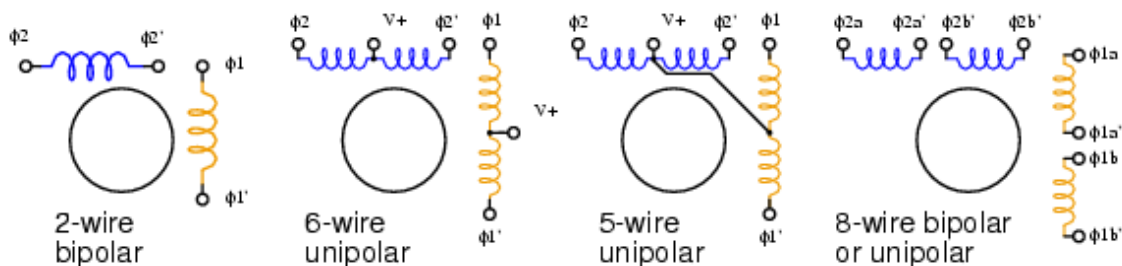


Obrázek 1 - Původní podoba pojezdu

Jednou z úprav bylo odstranění původní tiskové hlavy. Na její místo bylo totiž potřeba umístit osu kyvadla a snímání úhlu natočení.

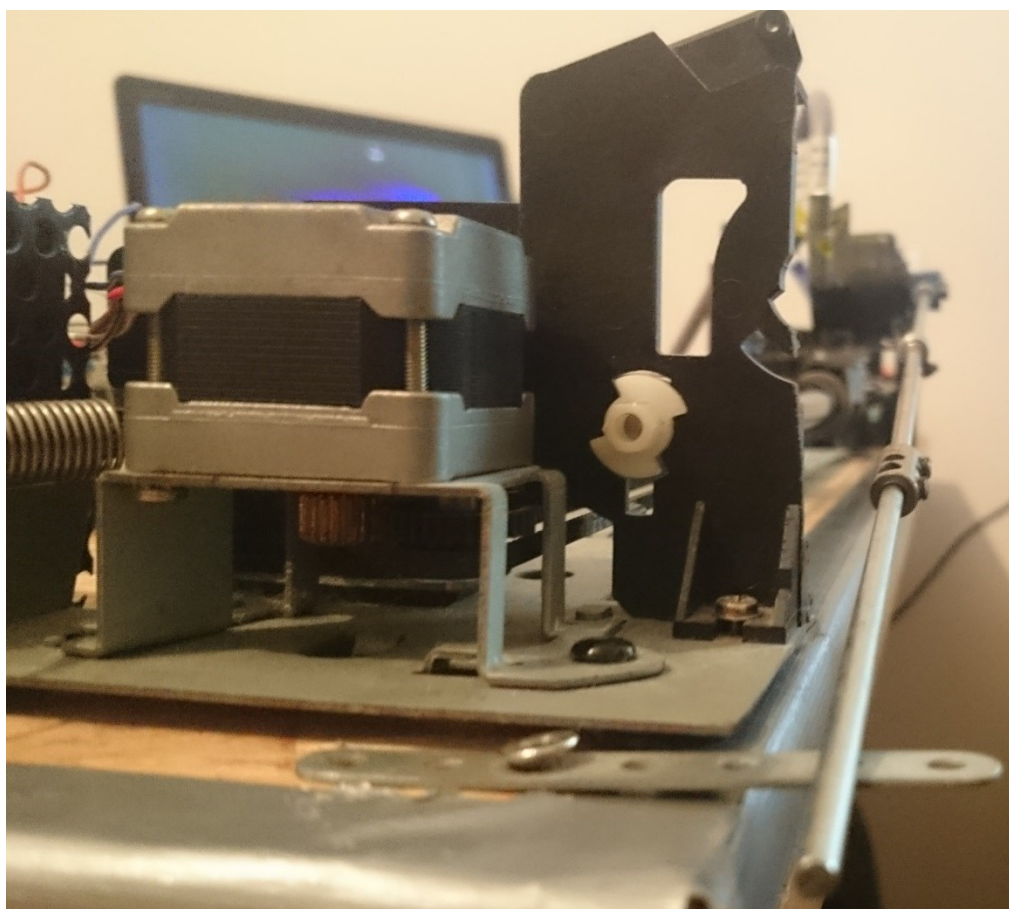
2.3 Pohon

Jako pohon byl využit stávající krokový motor. Jedná se o 5 vodičové unipolární zapojení. Všechny čtyři cívky mají vyveden vždy jeden konec cívky a společnou zem.



Obrázek 2 - Používaná zapojení krokových motorů

Krokové motory jsou vzdálenou a levnější variantou servopohonů, protože díky své konstrukci umožňují dobré řízení polohy bez nutnosti použití zpětné vazby. Hůře na tom je pak v případě řízení dynamiky. Nedodržením momentové charakteristiky se totiž může motor proklouznout a přijdeme tak o validní informaci o jeho skutečné poloze.



Obrázek 3 - Pohon s napínací pružinou řemenu

Tyto motory se tak na maximální otáčky musí uvádět postupně bez ostrých skoků, které to mohou zapříčinit. Bylo by dobré se tomuto jevu při regulaci vyhnout. Vznik nekontrolovaných ztrát kroků by totiž ve výsledku mohl znamenat to, že soustava bude ve výsledku velmi obtížně regulovatelná.

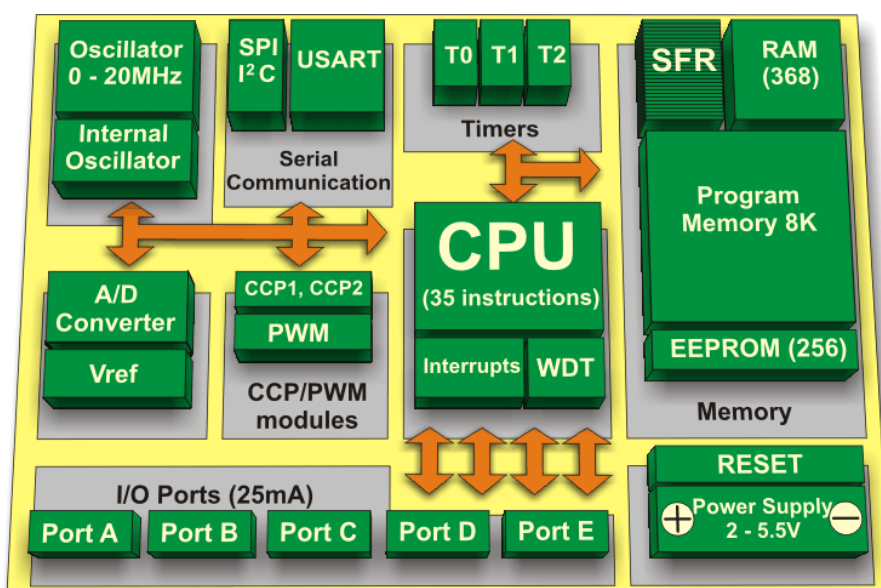
2.4 Výkonový stupeň

Pokud chceme s motorem pohnout, je potřeba mu dodat výkon. Tuto problematiku řeší některé integrované obvody. Mezi ně patří obvody L297 a L298. První z nich za pomoci vstupní frekvence a příznaku směru generuje požadovaný sled fází. Pokud se podle katalogového schématu spojí s druhým, výkonovým obvodem, vytvoří tak sofistikované řešení náběhu motoru, omezení proudu, ochraně proti přetížení i ztrátě kroku. I přes velké výhody, se zmíněná kombinace nedá v tomto případě použít. Výkonový stupeň je totiž složen ze dvou úplných H-můstků, kterými se dá ovládat pouze krokový motor s bipolárním zapojením nebo motor stejnosměrný.

Jinou alternativou byl obvod L293D, který se skládá ze čtyř polovičních H můstků. Obsahuje dokonce transily ke svedení špiček, vzniklých při přepínání indukční zátěže. Ve spojení s L297 však nepodporuje žádnou z předem zmíněných funkcí. Řešením je ho připojit přímo na digitální výstupy mikroprocesoru, na kterém se sekvence spínání bude provádět.

2.5 Mikroprocesor

Největší požadavky u výběru procesoru byly kladeny na přesné analogové převodníky a druhy přerušení. Bohužel většina běžných jednočipových procesorů nepodporuje převodníky s rozlišením vyšším než osm bitů. Pokud však ano, jejich cena je příliš vysoká v poměru s tím, jak by byly v tomto případě využity. Zvolena byla cesta řešit převodníky separátně. Pokud vezmeme v úvahu požadovaný počet kanálů, které budou využívány, je nasnadě využít některého sériového rozhraní. V tomto případě byla zvolena sběrnice SPI. Adeptem k využití se tedy stal procesor od firmy Microchip s označením PIC16F877A, doplněný externím oscilátorem.



Obrázek 4 - Struktura procesoru PIC16F887

2.6 Rozhraní

Tato práce bude též sloužit jako laboratorní úloha. Bylo tedy nutné vytvořit univerzální rozhraní, přes které bude přípravek komunikovat. Zvolena byla cesta pomocí analogových signálů v rozmezí napětí 0-5 V.

2.6.1 Vstupy

Pomocí jednoho vstupu se bude ovládat rychlost a směr krokového motoru, které bude procesor řídit. Hodnotu bude snímat dvoukanálový 12 bitový převodník MCP3202 s rozhraním SPI, který je schopen vzorkovat signály rychlostí až sta tisíc vzorků za vteřinu. K druhému kanálu bude připojen potenciometr, pomocí kterého se bude udávat počáteční pozice pro pohyb vozíku.

2.6.2 Výstupy

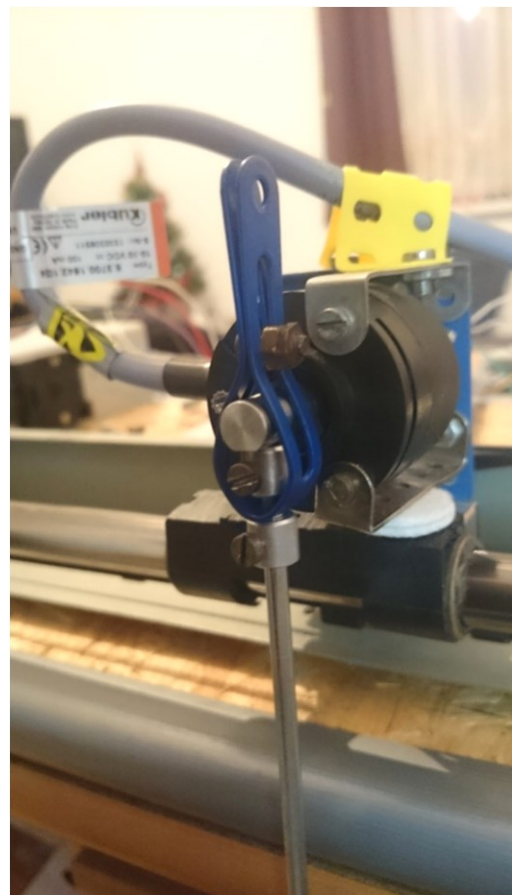
Výstupy ze systému budou dva. Jeden bude sloužit pro informaci o aktuálním úhlu natočení kyvadla, druhý pro polohu vozíku. Opět byl zvolen dvoukanálový převodník s SPI, a to MCP4922. Analogové výstupy je schopen nastavit za 4,5 μ s.

2.7 Snímání polohy

Pro snímání polohy byl zvolen inkrementální enkodér Kuebler. Jedná se o verzi, která za jedno otočení osy vygeneruje 1024 pulzů. To je pro tuto úlohu více než dostatečná přesnost. Další jeho nespornou výhodou je možnost připevnění samotného kyvadla přímo na jeho osu. Jedinou jeho nevýhodou je napěťový rozsah jeho napájení a výstupů 10-30 V. Na pracovní napětí 5 V je potřeba výstupní přizpůsobit. Nabízí se jednoduché řešení pomocí obyčejných optočlenů. Napájení 24V tedy bude společné s krokovým motorem.



Obrázek 5 - Mechanické provedení snímače a upevnění kyvadla na jeho osu



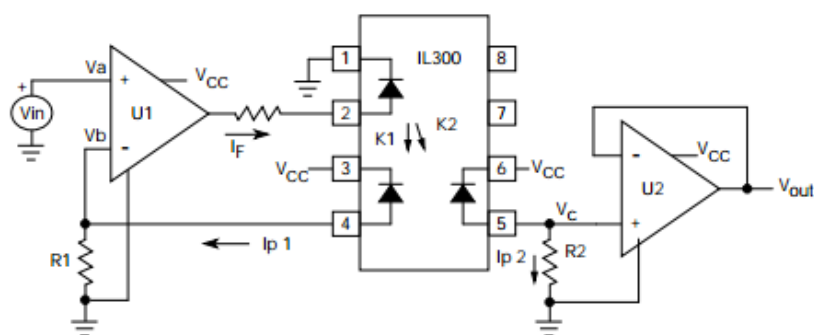
2.8 Elektronika

Obvod sestává ze dvou napěťových okruhů. Jeden je pro napájení řídicí elektroniky o velikosti napětí 5 V, druhý o 24 V pro inkrementální snímač a motor. Obě větve jsou od sebe odděleny stabilizátorem napětí 7805. Všechny součástky byly zapojeny podle katalogových listů výrobce, I/O piny procesoru pak podle možností a potřeby.

2.8.1 Galvanické oddělení

Protože bude přípravek používán i jako laboratorní úloha, bylo třeba popřemýšlet o galvanickém oddělení vstupů a výstupů. Zvláště, pokud chceme, aby byl připojitelný k různým měřicím kartám a odolnější vůči zničení. Kvůli nelinearitě na systému, která vzniká generováním rychlosti motoru časovačem, bylo uvažováno o jiném oddělení, než jsou klasické optočleny. Ty by do systému zanášely další zbytečnou nelinearitu a netřeba zmiňovat, že by to udělalo více složitým i samotné řízení.

Pro použití tedy byly otestovány speciální lineární optočleny IL300. Ty obsahují jednu diodu a dvě fotodiody se stejnými vlastnostmi a parametry. Jejich nelinearita se pomocí zpětné vazby od sebe odečítá a získáváme tím lineární závislost mezi vstupem a výstupem.



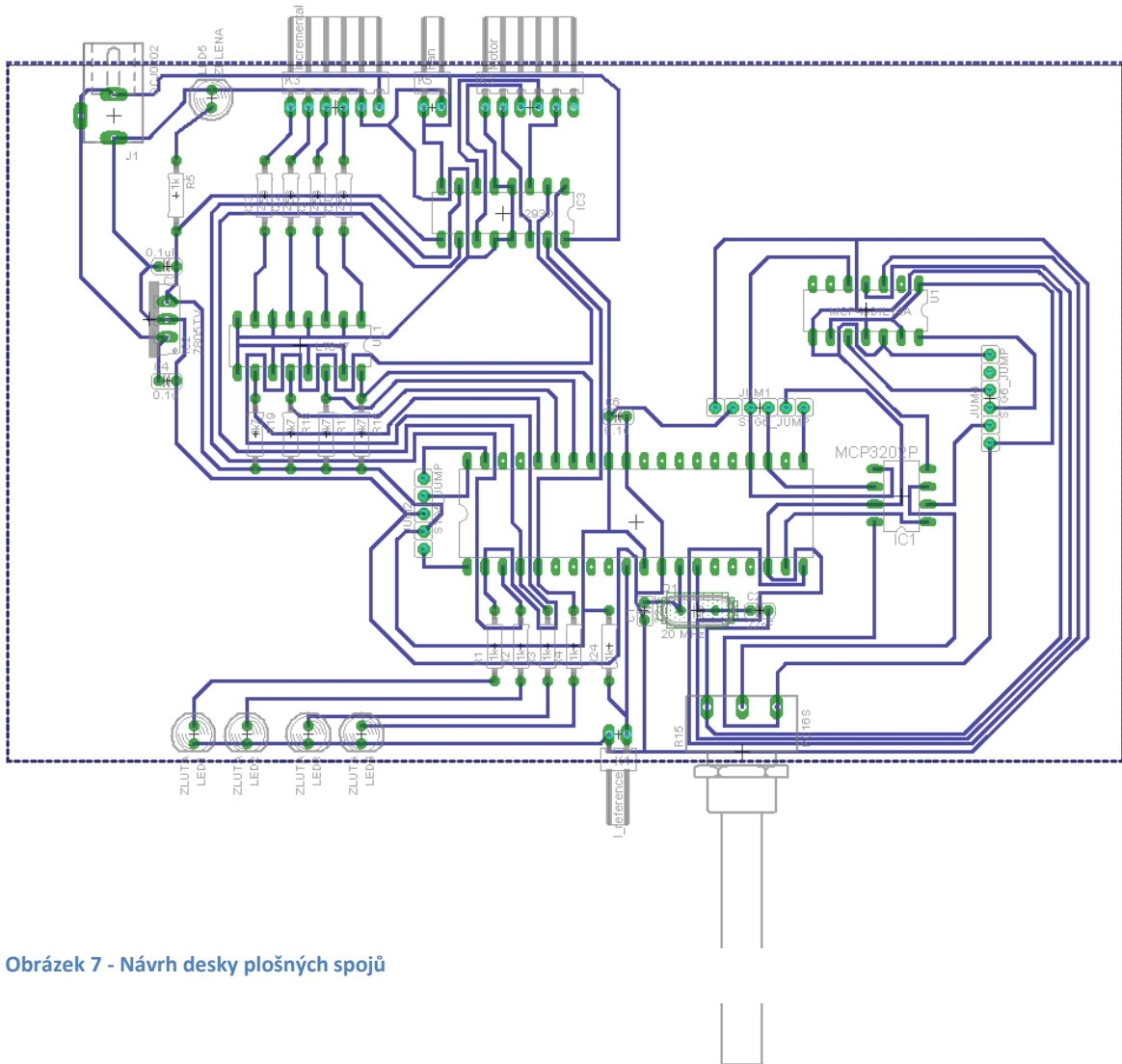
Obrázek 6 - Schéma zapojení uvažovaného galvanického oddělení

Jejich volba se však již při fázi vývoje elektroniky ukázala jako nevhodná. Ve spojení s operačními zesilovači a zapojením do obvodu se totiž na jejich výstupy zanášelo rušení na nízkých frekvencích. Hlavně tedy v okolí vzorkovací frekvence.

Z návrhu tedy byly odstraněny, protože zápory jejich použití převažovaly nad hlavním důvodem použití.

2.8.2 Návrh desky plošných spojů

Při návrhu nebylo potřeba volit cestu dvoustranné desky. Vše bylo řešeno klasickým provedením součástek, které se vhodně rozmístily na desku o velikosti 16x10 cm.



Obrázek 7 - Návrh desky plošných spojů

2.9 Struktura programu

Kód v mikrokontroleru byl napsán v prostředí microC PRO for PIC a nahrán pomocí aplikace ASIX UP přes programátor ASIX presto.

2.9.1 Komunikace s periferiemi

Jak již bylo zmíněno dříve, převodníky jsou připojeny k procesoru pomocí sběrnice SPI. Při programování bylo třeba použít knihoven, které tuto komunikaci zprostředkovávají. Nicméně samotné zpracování příkazů muselo být doprogramováno. Převodníky reagují pouze tehdy, mají-li nulový vstup CS, který slouží pro rozlišení jednotlivých obvodů na této sběrnici a jsou-li k tomu vyzvány. Například pokud chceme z A/D převodníku dostat aktuální hodnotu, pošleme mu příkaz, který je složen ze speciálních znaků. Nejdříve se mu musí poslat takzvaný startbit. Potom následuje kód kanálu, ze kterého chceme data vyčíst. V této fázi jako odpověď dostaneme první osmici bitů. Až po poslání nulového příkazu zbytek. Z něj však využijeme pouze čtyři bity a zbylá část se zamaskuje. V případě D/A převodu pošleme pouze kód kanálu a hned za ním požadovanou hodnotu. Knihovna už se pak postará o to, aby se rozdělila na dva bajty a oba z nich byly odeslány na sběrnici.

2.9.2 Obsluha přerušení

V tomto případě je většina kódu napsána v obsluze přerušení. Potřebujeme totiž zajistit stejnou periodu vzorkování vstupů a výstupů. Tu zajišťuje timer0, který je nastaven v programu napevno. Perioda se dá změnit pouze přímo v programu. Na druhou stranu bylo potřeba vyřešit řízení rychlosti krokového pohonu, která se mění podle aktuální hodnoty napětí na převodníku.

Postup je takový, že z dvanácti bitů se nejdříve vezme ten nejvyšší, který má funkci znaménka, a tím se nám rozpůlí celý interval na dvě stejné části pro oba směry otáčení. Zbýlých jedenáct bitů se vloží do registru 16 bitového časovače Timer1, pomocí nějž se upravuje doba jeho přetečení. Bity jsou vloženy tak, aby se okolí kolem poloviny napájení chovalo pro obě rychlosti jako nejnižší a zároveň, aby směrem od ní rostly. Minimální periody tedy bude časovač dosahovat při 0 a 5 V.

Při každém přetečení se vygeneruje další fáze, zapíše se na výstupy a poloha se podle aktuálně zvoleného směru a rychlosti inkrementuje nebo dekrementuje od

hodnoty uchovávané v mikrokontroleru. Tím dostaneme v ideálním případě aktuální polohu vozíku.

Další přerušení je nutné pro zjištění aktuální polohy kyvadla. Inkrementální snímač generuje dvě posunuté fáze. První je připojena na vstupní pin mikroprocesoru, který přerušení podporuje. To zajistí počítání jednotlivých generovaných pulzů snímače. Pomocí druhé fáze otočené o 90° zjistíme, podle sousledu s první, směr otáčení. Za otáčku vygeneruje přesně 1024 pulzů. Aby se využil rozsah výstupu, hodnota se před posláním na převodník vynásobí čtyřmi. Při každém připojení přípravku na napájení se aktuální hodnota úhlu nuluje, tudíž je jí nutno před začátkem měření zreferovat.

2.9.3 Hlavní program

Většina proměnných se před započítáním hlavního programu správně zinicuje. Co je však třeba teprve zjistit, je aktuální poloha vozíku a referenční poloha kyvadla, a to je právě stěžejní úkol hlavního programu.

Na jedné z hranic pojezdu je instalován koncový spínač, který byl zachován z původní tiskárny. Po startu programu se nastaví rozumná rychlost, kterou vozík pojede proti němu. Rychlost byla zjištěna experimentálně a byla nastavena tak, aby vozík hned po najetí na snímač stačil zastavit a nenarazil na mechanický konec pojezdu. Po zastavení vozíku se hodnota pozice vynuluje. Kyvadlo je nutné uvést do klidu, protože po vypršení nastavené prodlevy si nastaví referenční nulovou polohu a vozík pro potvrzení inicializace najede do pozice určené potenciometrem, kde už se pohyb řídí pouze pomocí analogového vstupu přípravku.

Vzhledem k tomu, že nulová hodnota představuje pro jeden ze směrů maximální rychlost, je třeba dbát na to, aby hodnota byla v blízkosti napětí 2,5 V, které znamená pro motor minimální rychlost. Pokud se tak nestane, tak další částí hlavního programu je podmínka, kdy musí být vozík ve virtuální poloze v ručně zjištěných mezích. Po jejich porušení se znovu zahájí inicializace, takže vozík nenabourá. Toto může být užitečné i v případě ovládní, které zapříčiní prokluz motorku a tudíž ztrátu informace o aktuální poloze vozíku. Vozík tak i při nabourání po chvilce přestane tlačit a vrátí se na startovací pozici. Tím se zajistí, že se nezničí motor ani řemínek, který je s ním spojen.

2.10 Ovládání přes analogové rozhraní

2.10.1 Analogová karta

Použita byla analogová karta od National Instrument NI USB-6008. Ta disponuje jak vstupy a výstupy digitálními, tak i analogovými. Výhodou této karty je připojení přes USB. Díky tomu lze kartu připojit i k obyčejnému laptopu. Většina karet totiž vyžaduje mít počítač s volným portem PCI, nemluvě o jejich ceně.

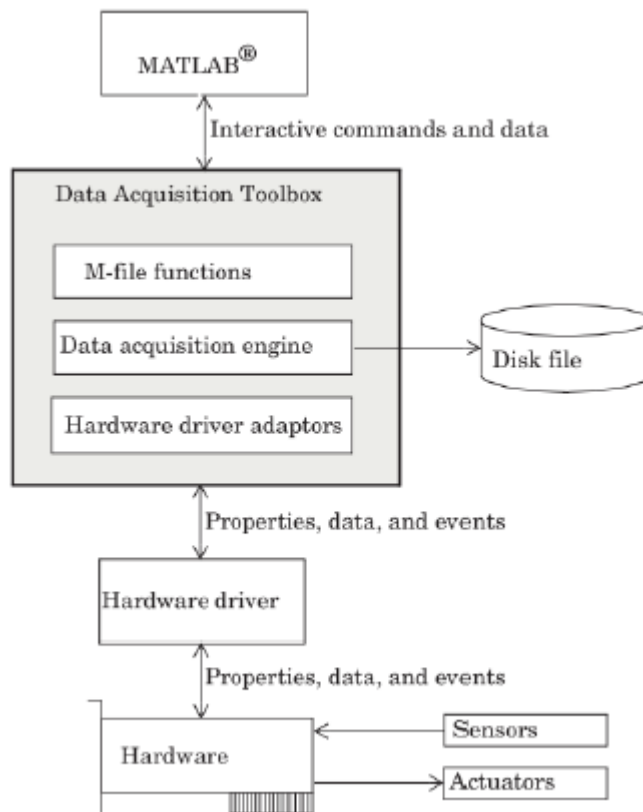
Kartu je možné integrovat do Matlabu skrze NI-DAQmx. Jediné, co je potřeba, je mít nainstalován toolbox DAQ a odpovídající verzi Matlabu.



Obrázek 8 - Měřicí karta NI USB-6008

2.10.2 Analogové vstupy a výstupy

Výrobce deklaruje rozlišení vstupů na 12 bitů při rychlosti vzorkování 10 kS/s. Pokud vezmeme v úvahu, že tyto parametry platí pro jeden kanál při využití celého napěťového rozsahu karty, přesto se dostaneme na slušné hodnoty, které k ověření funkce a přípravku a jeho řízení budou stačit. Školní laboratoře disponují mnohem výkonnějšími kartami, které pak dovolí mnohem jemnější řízení.



Obrázek 9 - Schéma funkce DAQ

Nevýhodou použité karty, její největší slabinou, je to, že neobsahuje vnitřní spouštěč analogových výstupů. To v praxi znamená, že výstupům na kartě nelze nastavit pevnou periodu vzorkování. Jejich nastavování ve vzorkovací periodě však MATLAB zvládne sám. Pro tuto kartu se určuje vzorkování společně pro všechny použité kanály. Vzorkovací a výpočetní perioda byla nastavena na 0,01 s.

Bylo využito možnosti diferenciálního měření karty mezi žádanými výstupy přípravku a společnou zemí. Toto nastavení velmi dobře eliminuje šum při větších změnách vstupního napětí.

3. Inverzní kyvadlo

3.1 Identifikace systému

Pokud chceme vozík řídit tak, abychom docílili požadovaného chování kyvadla, je potřeba systém jako takový nejdříve identifikovat. Vzhledem k tomu, že se jedná o složitý systém, bude jednodušší si ho rozložit na jednotlivé celky, které se nakonec spojí dohromady.

Funkční cestou k identifikaci kyvadla povedou Lagrangeovy rovnice druhého druhu. Po identifikaci bude potřeba porovnat simulovanou soustavu s reálnou a případně upravit parametry simulované soustavy tak, aby se co nejlépe shodoval se systémem reálným.

3.1.1 Lagrangeovy rovnice druhého druhu

[11] Odvození Lagrangeových rovnic druhého druhu vychází z principu virtuálních prací. Podle toho je soustava v rovnováze, pokud je virtuální práce všech působících sil nulová.

$$\delta\omega = \sum_{i=1}^n Q_i \delta q_i \quad (3.1)$$

- Q_i – zobecněná síla působící ve směru i -té souřadnice
- q_i – i -tá zobecněná souřadnice

Síly v soustavě můžeme rozdělit na konzervativní a nekonzervativní. Konzervativní síly zachovávají energetickou bilanci systému, součet kinetické a potenciální energie se účinkem konzervativních sil nezmění. Naopak působením nekonzervativních sil se energetická bilance systému mění. Tyto síly jsou představovány např. silami závislými na rychlosti.

Základní tvar Lagrangeových rovnic je

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_i^* \text{ pro } i = 1, 2, \dots, n. \quad (3.2)$$

- L – Lagrangeova funkce
- Q_i^* - zobecněná nekonzervativní síla

Lagrangeova funkce L , označována též jako kinetický potenciál, je definována

$$L = E_k - E_p [J] \quad (3.3)$$

- E_k – kinetická energie celé soustavy

- E_p – potenciální energie celé soustavy

Vlastní pohybové rovnice pro zavedené zobecnělé souřadnice lze tak sestavit pouze pomocí skalárních veličin – kinetické a potenciální energie.

Při aplikaci Lagrangeových rovnic druhého druhu postupujeme:

- 1) Definujeme nezávislé zobecnělé souřadnice
- 2) Určíme kinetickou energii jako funkci rychlostí zobecněných souřadnic
- 3) Stanovíme potenciální energii jako funkci zobecněných souřadnic, která bude charakterizovat vliv všech konzervativních sil
- 4) Stanovíme Lagrangeovu funkci podle rovnice (3.3)
- 5) Určíme zobecnělé nekonzervativní síly
- 6) Provedeme odvození pohybových rovnic podle vztahu (3.2)

Pro kinetickou energii kyvadla z obr. () platí, že

$$E_k = \frac{1}{2}J\omega^2 = \frac{1}{2}J\dot{\varphi}^2 [J]$$

- $\omega [rad \cdot s^{-1}]$ – úhlová rychlost ramene kyvadla
- $J [N \cdot m]$ – moment setrvačnosti ramene k místu závěsu

Pro potenciální energii platí

$$E_p = E_{p_{konst}} - mg \frac{l}{2} \cos \varphi [J]$$

- $g = 9,81m \cdot s^{-2}$ – gravitační konstanta
- $\varphi [rad]$ – výchylka ramene od svislé polohy
- $E_{p_{konst}}$ – potenciální energie v místě závěsu

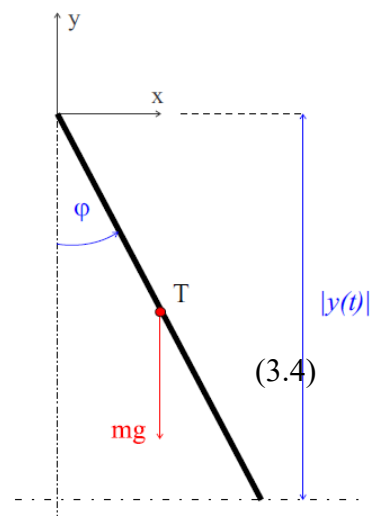
Jelikož derivace konstanty je nula, nebudeme již uvažovat konstantní potenciální energie.

Moment setrvačnosti ramena k místu ukotvení, za předpokladu, že je rameno homogenní, se odvodí z tohoto vztahu

$$J = \int_m l^2 dm = \int_V l^2 \rho dV [m^2 \cdot kg]$$

- $l [m]$ – délka ramene
- $m [kg]$ – hmotnost tělesa
- $V [m^3]$ – objem tělesa

Spočítáme objem elementu tělesa dV a dosadíme ho do rovnice (3.4).



Obrázek 10 - Fyzikální kyvadlo

$$dV = \pi r^2 dl \rightarrow J = \pi \rho r^2 \int_l l^2 = \frac{1}{3} \pi \rho r^2 l^3$$

Tím jsme dostali výraz, do kterého dosadíme za hustotu a získáme výsledný vztah pro moment setrvačnosti ramene kyvadla k místu závěsu.

$$J = \frac{1}{3} ml^2 \quad (3.5)$$

Při pokračování odvození, dle rovnice (3.3), dostaneme Lagrangeovu funkci:

$$L = \frac{1}{2} J \dot{\varphi}^2 + mg \frac{l}{2} \cos \varphi \quad (3.6)$$

Tuto Lagrangeovu funkci upravíme dle vztahu (3.2) a dostaneme rovnici

$$J\ddot{\varphi} + \frac{mgl}{2} \sin \varphi = Q_1^*, \text{ jejíž pravou stranu neznáme.}$$

V soustavě jediná zobecněná nekonzervativní síla, která způsobuje pokles amplitudy kmitů. Tato odporová zobecněná síla je přímo úměrná úhlové rychlosti ramene

$$Q_1^* = -2\delta J \dot{\varphi} \quad (3.7)$$

Mínus znamená to, že je to odporová síla působící proti pohybu ramene. Tím jsme dostali výslednou pohybovou rovnici našeho kyvadla

$$\ddot{\varphi} + 2\delta \dot{\varphi} + \omega_0^2 \sin \varphi, \quad (3.8)$$

Kde δ je koeficient útlumu definovaný vztahem

$$\delta = \frac{1}{nT} \ln \frac{A(t)}{A(t+nT)} [s^{-1}] \quad (3.9)$$

- $T [s]$ – perioda kmitů
- $A(t)[rad]$ – amplituda kmitů v čase t
- n – přirozené číslo

3.1.2 Identifikace kyvadla

Vlastní úhlová frekvence kmitů ω_0 je

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{mgl}{2J}} = \sqrt{\frac{3g}{2l}} [s^{-1}]$$

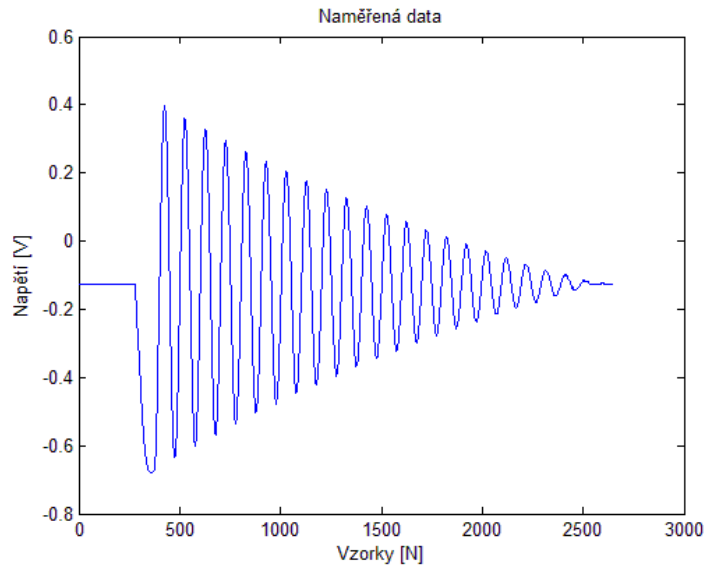
Změřené parametry kyvadla jsou:

- Délka ramena – 0,362m
- Hmotnost ramena – 0,037kg

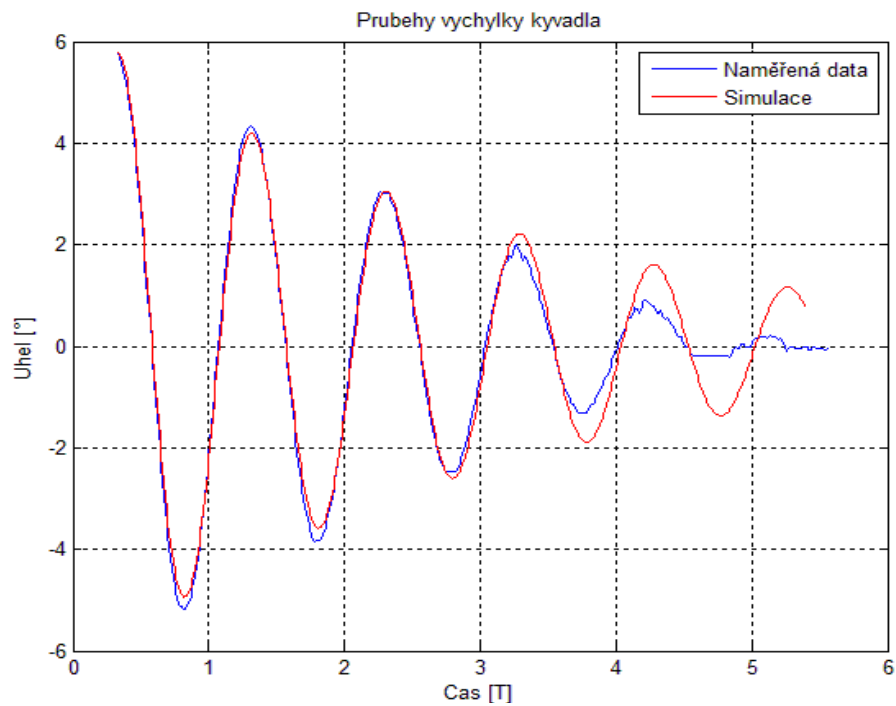
Z nich dle rovnice (3.5) dostaneme moment setrvačnosti kyvadla

$$J = 1,61621 \cdot 10^{-3} kgm^2$$

Chybějící koeficient útlumu je nutné změřit pro $|\varphi| \leq 6^\circ$, kdy přibližně platí $\sin \varphi \approx \varphi$ a rovnice (3.8) je lineární.



Obrázek 11 - Surová data pro vstup do identifikace



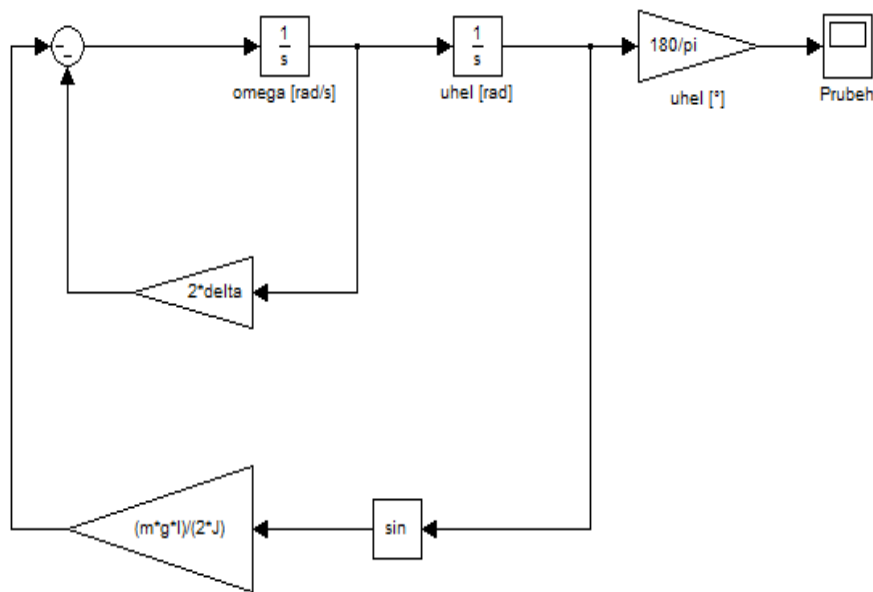
Obrázek 12 - Porovnání naměřených dat a simulace

Vzhledem k tomu, že podmínka pro získání lineárního modelu je úzce vázána na velikost úhlu, bylo nejlepší vytvořit script, pomocí něž se dalo měření několikrát zopakovat a zprůměrovat je, pro získání lepších výsledků. Z počátku měření při klidové poloze kyvadla si nejdříve vezme hodnotu napětí a adekvátně posune napěťovou osu. Dále si automaticky ořízne vyšší odchylky kyvadla a zahodí je. Následně algoritmus zjistí velikost parametru delta a periody.

$$\delta = 0.325025s^{-1}$$

$$T = 1.253325s$$

Z porovnání obou průběhů je vidět, že reálný systém má při výchylce menší než dva stupně mnohem větší tlumení. Pro výpočet proto byly brány v úvahu pouze první čtyři hodnoty maximální amplitudy. Průběhy se dostatečně překrývají a proto můžeme identifikaci volného kyvadla úspěšně uzavřít.



Obrázek 13 - Model kyvadla

3.1.3 Identifikace vozíku

Podle štítku na původním krokovém motoru se bohužel nepodařilo najít jeho provozní parametry. Vzhledem k absenci zpětné vazby rychlosti a polohy vozíku byla identifikace provedena hlavně pro účely simulace.

Využitelná dráha pojezdu je přibližně 34 cm. Pomocí experimentálně nastaveného počtu kroků přímo na mikroprocesoru bylo zjištěno, že jeden krok motoru odpovídá 0,21 mm dráhy vozíku. Na napěťovém vstupu pak 2,5 mV.

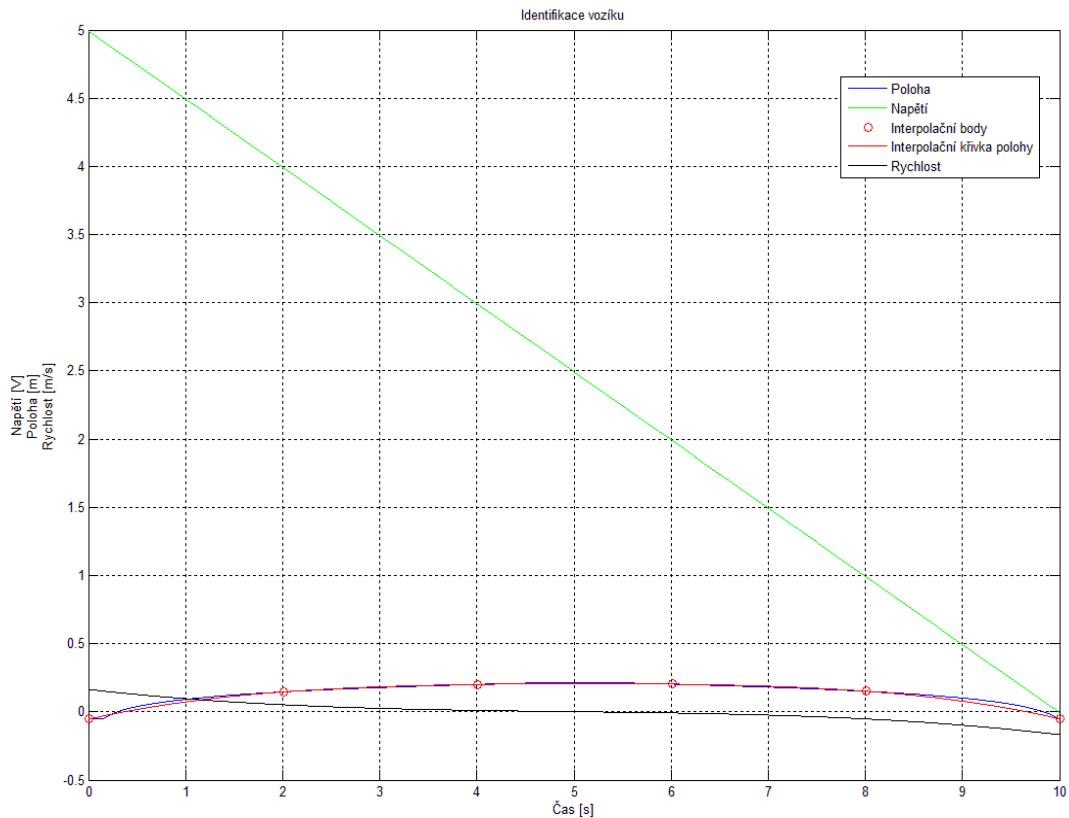
V Simulinku byla na výstup napětí pro rychlost vozíku nastavena rampa od maximálního až k nulovému napětí tak, aby se vozík stačil rozjet a zastavit na omezené dráze. Při vyšších rychlostech však už docházelo ke ztrátě kroků. To však bohužel není možné z informace o poloze zjistit. Je ale možné získat závislost výstupního napětí na předpokládané rychlosti vozíku.

Vzhledem k přítomnosti šumu není příliš vhodné použít derivaci k získání rychlosti přímo. Byla zvolena cesta, kdy bylo na průběh polohy položeno rovnoměrně několik bodů, které se proložily interpolační křivkou, která je hladká. Její derivací se získala závislost řídicího napětí a rychlosti vozíku.

Vlivem počtu operací a zaokrouhlovacích chyb však nedostaneme dostatečný popis systému, jehož přenos by se dal použít k regulaci. Nicméně k simulaci bude stačit, když závislost vložíme do komponenty look-up table (převodní tabulky), kterou prostředí Matlab Simulink disponuje. Hodnoty, které v tabulce chybí, jsou automaticky dopočítávány interpolací a extrapolací nejbližších hodnot.

V reálných podmínkách motorek není schopen dosáhnout příliš velkých rychlostí. Maximální dosažitelná rychlost vozíku tak nebude dostatečná, aby vyrovnala větší výchylky kyvadla.

Z naměřených dat je patrné, že ovládání je lineární kolem středu ovládacího napětí. Naopak na jeho hranicích je nelineární. Bude nutné, aby v případě úlohy balancování byla výchylka kyvadla co nejmenší, protože pro dorovnání větších výchylek je potřeba co největších rychlostí. Při těch je ale ovládání nelineární.



Obrázek 14 - Identifikace pohonu a vozíku

3.1.1 Model kyvadla na pohyblivém vozíku

Vzhledem k absenci přesného popisu chování použitého pohonu a jeho vlastnostem bude hmotnost vozíku zanedbána. Při větší dynamice totiž bude vlivem hmotnosti vozíku docházet ke ztrátě kroků motorku. Musí se tak počítat s tím, že akční veličina musí být omezena tak, aby k tomuto jevu nedocházelo. Pohon musí v celém rozsahu kinetickou energii soustavy zvládnout bez ohledu na velikosti a rychlosti změny akční veličiny.

[11] Potenciální energie kyvadla tak je

$$E_P = -\frac{l}{2} mg \cos \varphi,$$

kinetická energie je

$$E_K = \frac{1}{2} m v_u^2 + \frac{1}{2} J_T \omega_r^2.$$

- m – hmotnost ramene kyvadla
- v_u – unášivá rychlost ramene
- ω_r – relativní rotace ramene (v těžišti ramene)

- J_T – moment setrvačnosti k těžišti ramene $\rightarrow J_T = \frac{1}{12} ml^2$

Nejprve určíme složky unášivé rychlosti v osách x a y

$$v_{u_x} = \dot{x} + \frac{l}{2} \dot{\varphi} \cos \varphi$$

$$v_{u_y} = \frac{l}{2} \dot{\varphi} \sin \varphi$$

Rychlost v kladném směru osy je \dot{x} . Pomocí Pythagorovy věty získáme vztah pro unášivou rychlost v_u , kterou potřebujeme pro výpočet kinetické energie.

$$v_u^2 = v_{u_x}^2 + v_{u_y}^2 = \dot{x}^2 + \dot{x}\dot{\varphi}l \cos \varphi + \frac{l^2}{4} + \dot{\varphi}^2$$

Relativní rotace je $\omega_r = \dot{\varphi}$

Poslední dva vztahy dosadíme do vzorce pro kinetickou energii podle vzorce (3.5) a podle vztahu (3.3) určíme Lagrangeovu funkci L

$$L = \frac{1}{2} m(\dot{x}^2 + \dot{x}\dot{\varphi}l \cos \varphi + \frac{1}{3} l^2 \dot{\varphi}^2 + gl \cos \varphi). \quad (3.20)$$

Pokud budeme považovat za tvrdý zdroj polohy a pohyb kyvadla ji nebude ovlivňovat, budeme tuto funkci derivovat pouze podle φ . Tím dostaneme pohybovou rovnici pro průběh výchylky kyvadla.

Postupujeme-li podle Lagrangeových rovnic, dostaneme rovnice

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\varphi}} = \frac{d}{dt} \left[\frac{1}{2} m (\dot{x}l \cos \varphi + \frac{2}{3} l^2 \dot{\varphi}) \right] = \frac{1}{2} m (\dot{x}l \cos \varphi - \dot{x}\dot{\varphi} \sin \varphi + \frac{2}{3} l^2 \ddot{\varphi}),$$

$$\frac{\partial L}{\partial \varphi} = \frac{1}{2} m (-\dot{x}\dot{\varphi}l \sin \varphi - lg \sin \varphi),$$

které po sloučení vyjadřují pohybovou rovnici systému

$$\frac{1}{2} ml \left(\ddot{x} \cos \varphi + \frac{2}{3} l \ddot{\varphi} + g \sin \varphi \right) = Q_1^*.$$

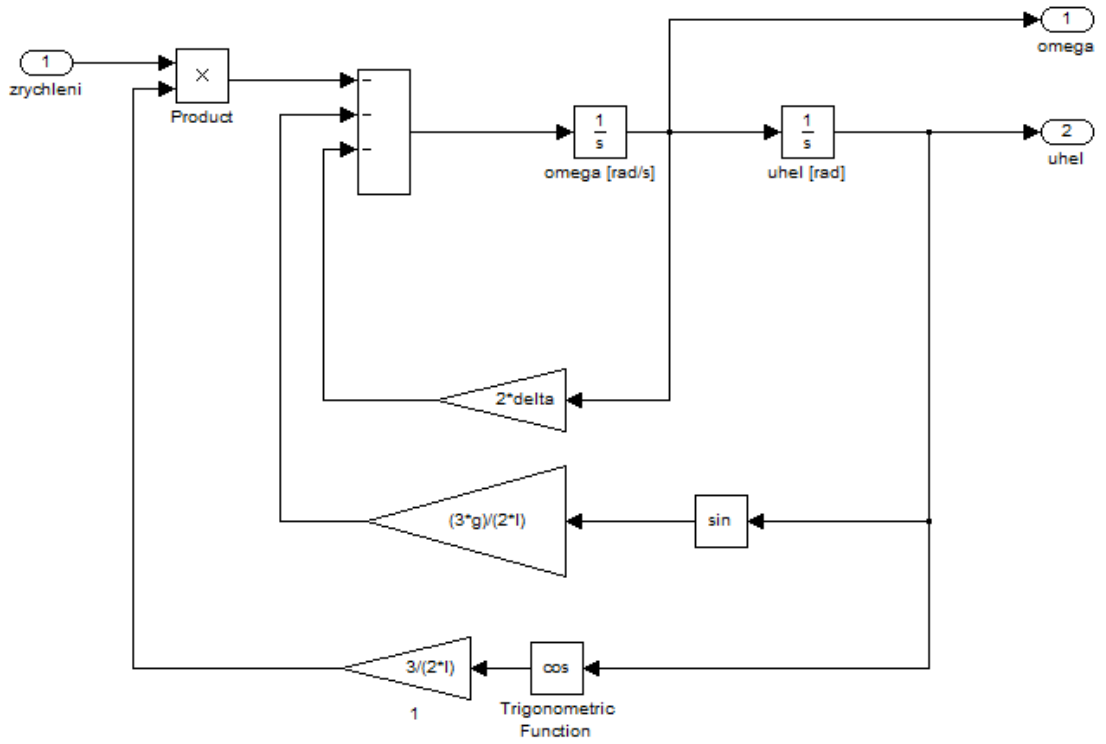
Pravá strana v této rovnici je stejná jako ve vztahu (3.7).

Odvozená pohybová rovnice kmitů je

$$\ddot{\varphi} + 2\delta\dot{\varphi} + \omega_0^2 \sin \varphi = -\frac{3}{2l} \ddot{x} \cos \varphi,$$

levá strana rovnice je přitom stejná jako ve (3.8). Pravá pak reprezentuje vynucené kmity kyvadla, způsobené zrychlením vozíku.

Vyjádřením druhé derivace úhlu dostaneme simulační schéma kyvadla na pohyblivém závěsu.



Obrázek 15 - Model kyvadla unášeného vozíkem

3.2 Možné konfigurace systému

V případě systému inverzního kyvadla se dvěma stupni volnosti (pojezd vozíku a rotace kyvadla) v jedné rovině je možné uvažovat o třech základních konfiguracích systému.

3.2.1 Vyhoupnutí kyvadla

První z nich může být například vyhoupnutí kyvadla vzhůru. Způsobů provedení může být hned několik, v závislosti na délce dráhy a dynamice pohonu. Pokud máme motor, který dosahuje vyšších rychlostí a dráha pojezdu je dostatečně dlouhá, může být pro vyhoupnutí využita kinetická energie kyvadla. Vozík se rozjede s maximálním zrychlením a po dosažení požadované rychlosti se jeho směr změní a tím se kyvadlo dostane nad vodorovnou osu, v ideálním případě do horní svislé polohy. V reálném případě však budeme drahou a rychlostí zcela jistě omezeni.

Dalším proveditelným způsobem je, že do systému budeme energii dodávat postupně, a to jeho rozhoupáváním. Tím se zkrátí použitá dráha a zmenší se nároky na dynamiku pohonu. Pro tento způsob je jako v předchozím případě, nejdůležitější rychlost změny směru. To znamená, že pohon musí být schopný co nejdříve zastavit a rozjet se na druhou stranu. Pokud to však budeme provádět s pevnou periodou, žádaného výsledku nedosáhneme. Naopak největší účinnosti tohoto způsobu docílíme, pokud směr pohybu změníme co nejbližší chvíli, kdy kyvadlo prochází nulovou polohou. Amplituda kmitů se bude postupně zvětšovat, až se dostane do polohy vzhůru.

Nesložitější úlohou této konfigurace je však to, aby se kyvadlo nepřehouplo, nezačalo rotovat a zůstalo alespoň chvíli v horní poloze bez dalšího zásahu. Je to důležité v případě, že chceme kyvadlo udržet nahoře.

3.2.2 Balancování kyvadla v horní poloze

Příkladem z praktického využití této úlohy, můžeme zmínit známé vozítko Segway. Podle toho, jak se nakláníte dopředu a dozadu, ovládáte směr, rychlost a samozřejmě je udržení pasažéra na dopravním prostředku. V tomto případě je úloha s kyvadlem velmi podobná. Vzhledem k tomu, že je systém přibližně lineární pouze v rozmezí 6 stupňů, nesmí být regulační zásahy příliš veliké, protože by mohly způsobit

vychýlení kyvadla mimo tyto meze. Navíc s větší odchylkou je potřeba využití ještě většího zrychlení, což by ještě zvýšilo požadavky na dynamiku pohonu vozíku.

3.2.3 Dojezd vozíku bez překmitu kyvadla

Další úloha, jejíž použití můžeme znát z praktického příkladu. Vezměme si například situaci, kdy máte portálový jeřáb, který nese nějaké břemeno. Při přenášení získá nějakou kinetickou energii, kterou je potřeba při jeho zastavení co nejvíce vstřebat jemným zastavením tak, aby se co nejméně rozhoupalo. V případě použití této úlohy na kyvadle s vozíkem jsou výhodou informace o vlastnostech kyvadla, nebo případného závaží na něm a jeho přesný úhel natočení, které portálová jeřáb nemá.

Úloha se dá ještě ztížit tím, že kyvadlo bude padat z horní polohy, nebo mu můžeme pomoci postrčením.

3.3 Kyvadlo jako laboratorní úloha

Všechny tři dříve zmíněné konfigurace mohou být použity jako laboratorní úlohy. Nápomocná pak bude i referenční hodnota polohy určená potenciometrem. Pro první dvě konfigurace je vhodné ji nastavit někam blízko středu rozsahu polohy vozíku a při třetí na jeden z jejích krajů. Nemusí se tak obstarávat pomocí ovládacího programu na počítači. Stačí pouze najet na jednu z hranic pojezdu, při které se zahájí inicializace a vozík na tuto dráhu najede sám. Je ale třeba dbát na to, že během této doby přípravek akční zásahy zcela ignoruje.

Úkoly pro studenty se mohou pohybovat od identifikace volného kyvadla až po jeho regulaci.

3.4 Rozšíření a vylepšení

3.4.1 Pohon

Již po identifikaci a rychlostních testech pojezdu je jasné, že motorek, ponechaný z tiskárny nedisponuje dostatečnou dynamikou. Byl nejspíše navržen tak, aby se plynule rozjel od kraje pojezdu až na hranici tisku a držel optimální udržitelnou rychlost s patričným točivým momentem, aby byl tisk co nejpřesnější. Důvodem domněnky je absence jakékoli zpětné vazby v původní tiskárně.

Řešením by bylo zvýšení napájecího napětí motoru, což by znamenalo, že by se k přípravku musel přidat další napájecí zdroj. Současný zdroj má totiž napětí 24 V a byl kompromisem, aby sloužil i pro napájení inkrementálního snímače, který má napájecí rozsah 10-30 V. Na druhou stranu se ale při současném napájení motor při větším zatížení velmi hřeje, stejně tak jeho výkonový stupeň, který pracuje ve špičkách až při 1,6 A. Zahřívání je způsobeno vysokým proudem, který prochází cívkou i po dokončení kroku. Již dříve zmíněné vlastnosti ovládacích driverů bipolárních krokových motorů tento proud umí omezit. Výkon je tak dodáván pouze, pokud je to potřeba k pohybu, a zbytečně se nemění na teplo. To zajišťuje vnitřní proudová regulace. Další výhodnou vlastností těchto driverů je i tak zvaný „chopper“, který cívky nebudí prudkým skokem, ale rampou, zlepšující přechodový jev při jednotlivých krocích motorku a zlepšuje tak dynamické vlastnosti pohonu.

Jako další nedostatek se jeví ovládání motorku pomocí časovače v mikroprocesoru, protože s ním nelze dosáhnout lineárního ovládání rychlosti při požadované jemnosti ovládání. Lepší by bylo ovládat pohon přímo ovládacím napětím například přes lineární výkonový zesilovač, nebo servopohon s korespondujícím vstupem napětí nebo datovou sběrnicí.

3.4.2 Zpětná vazba

Absence zpětné vazby polohy vozíku neumožňuje přímou identifikaci vlastností motorku. V případě použití krokového motoru tak není možné zjistit ztrátu kroků, která při vyšší dynamice bohužel vzniká. Bez dispozice katalogového listu, ve které jsou navíc obsaženy informace jako jmenovitý napájecí proud a graf momentové charakteristiky motoru, musely být hodnoty zjištěny experimentálně, což není úplně dostatečné.

Poloha kyvadla je počítána mikroprocesorem a interpretována napětím na výstupu z přípravku. Nastává tedy problém při přechodu z úhlu 360° na nulový úhel. V tomto bodě totiž vznikne skok napětí přes celý rozsah, což ve výsledku zapříčiní nespojitost signálu. Nula tedy musela být umístěna kousek od hranic výchylky při balancování. Při rozhoupávání kyvadla je tedy dobré se této oblasti vyhnout a žádané hodnoty dosáhnout z druhého směru otáčení. V úloze balancování je však tato oblast dostatečně vzdálena tak, aby nezasahovala do požadovaného rozsahu výchylek kyvadla.

Jedním z řešení, které by tuto situaci vylepšilo, je zmenšení úrovně rozlišení inkrementálního snímače mikroprocesorem. Jedna otáčka kyvadla by tak reprezentovala ne celý, ale čtvrtinu rozsahu výstupního napětí. Tím bychom dostali informaci i o dvou otáčkách vlevo nebo vpravo. Nevýhodou tohoto řešení je však šum, který se projeví mnohem více.

Z tohoto důvodu se tak většinou při použití inkrementálního snímače používají čítače, které zpracovávají přímo jeho signály. Vyhýbá se tak rušení a omezení napěťovým rozsahem.

3.4.3 Tuhost konstrukce

Inkrementální snímač je k původnímu nosiči tiskové hlavy přidělán dost pevně, aby se zamezilo rušivým vlivům soustavy. Bohužel, až na podstavu, je to poslední pevný člen v systému. Pojezd totiž výrobci nebyl navržen na proměnné vertikální zatížení. Pohyb kyvadla tak při určitých situacích způsobuje kývání nosiče. Dost tuhý není ani řemenný převod.

3.4.4 Rozšíření pomocí sběrnice SPI

Již návrh desky počítá s jedním rozšířením pomocí sběrnice SPI. Ten je primárně zamýšlen pro další ovládací periférii. Tou by mohl být například jiný mikroprocesor, disponující tímto rozhraním, jako další možnost řízení přípravku. Nicméně, toto nemusí být koncový počet zařízení, protože na mikroprocesoru je dostatečný počet volných výstupů pro přepínání mezi více perifériemi. Sběrnice SPI totiž může v jeden okamžik obousměrně komunikovat pouze s jednou periférií, která je volena pomocí signálu „chip select“.

4. Řízení

V předchozích kapitolách byly zjištěny horší dynamické vlastnosti pohonu a některé konstrukční nedostatky, které budou regulaci ztěžovat. Nejdříve se podíváme na regulaci kyvadla v simulaci, kde se nebude uvažovat ztráta kroků a užije se model kyvadla, který byl odvozen v kapitole 3.

Dále se text zaměří na vyšvihnutí reálného kyvadla a jeho následné balancování.

4.1 Možnosti řízení

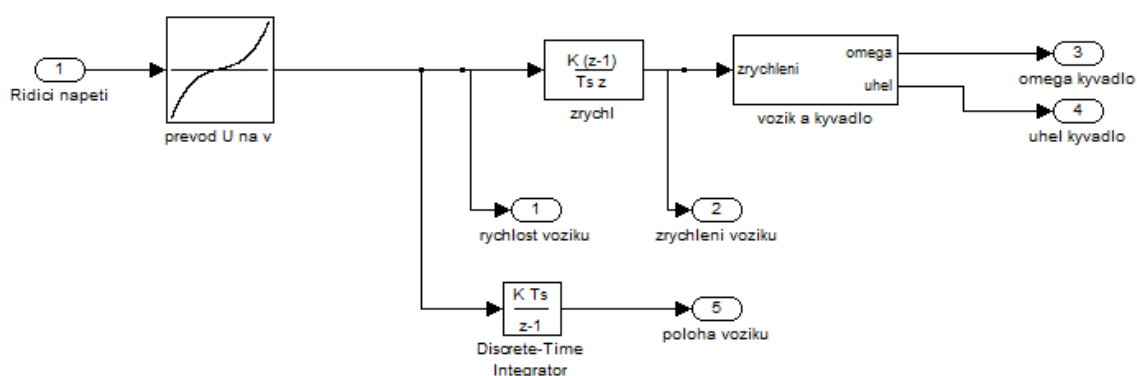
Vzhledem k chybějícím datům použitého motoru, nebylo možné vytvořit jeho matematický popis. Proto byla zvolena regulace soustavy pouze regulátorem typu PID, který se dá v jistých případech nastavit experimentálně, protože je snadno parametrizovatelný.

Pro řízení budou použity dvě regulační smyčky s PID regulátory. Vnitřní, rychlejší, smyčka se bude starat o regulaci úhlu kyvadla, vnější pak o udržení referenční polohy vozíku.

4.2 Simulační model vozíku s kyvadlem

Z odvozeného modelu kyvadla a změřených vlastností motoru bylo potřeba nejprve sestavit funkci v Simulinku, které bylo doplněno i o podružné informace o velikostech dalších veličin, které nakonec nebyly použity. Místo matematického modelu je použita zjištěná převodní charakteristika mezi napětím a rychlostí při jeho identifikaci.

Tato funkce byla vložena do regulačního schématu.

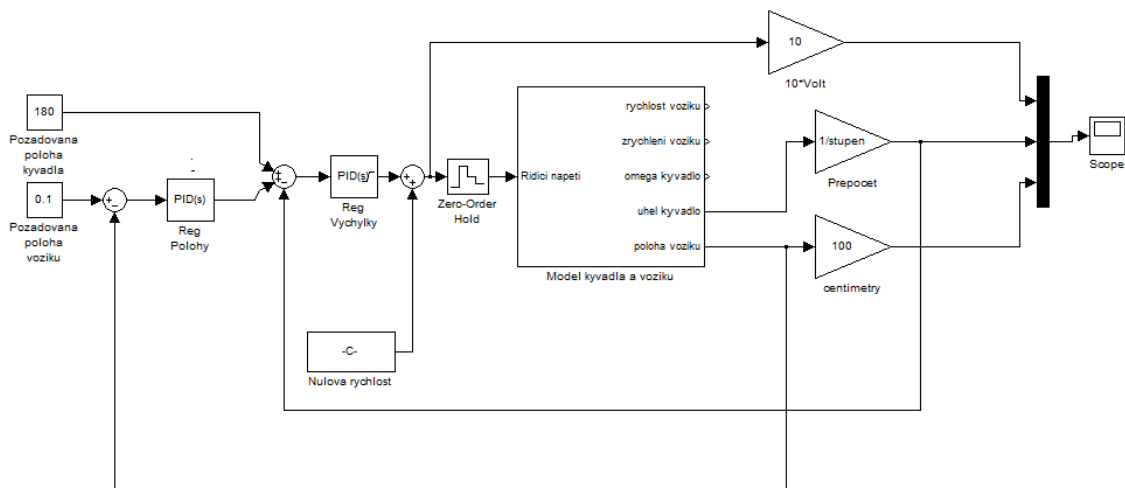


Obrázek 16 - Simulační model vozíku s kyvadlem

V hlavním programu a ve všech vnořených funkcích byly na všech integrátorech nastaveny takové počáteční podmínky, aby odpovídaly klidové poloze kyvadla vzhůru. Též byla nastavena i požadovaná poloha pojezdu vozíku, aby při začátku simulace nastal ideální klidový stav pro začátek regulace.

4.2.1 Simulované balancování kyvadla

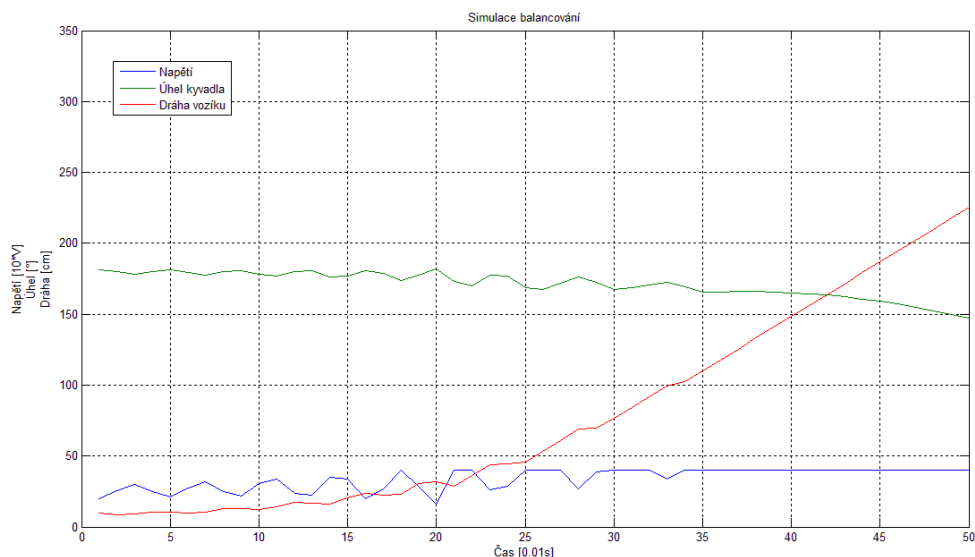
V případě takovéto kaskádní regulace se postupuje zásadně od vnitřku soustavy. Nejdříve tak přišla na řadu regulace kyvadla. Jako první se nastavilo zesílení regulátoru tak, aby výchyly kyvadla $\pm 6^\circ$ od horní svislé polohy pokryly celé ovládací napětí. Tak by to bylo u soustavy, u níž by byl pohon navržen přímo pro tuto úlohu bez jakékoliv výkonové rezervy pro kyvadlo, které by mělo v rotační ose velký třecí odpor. Derivační složka a filtr regulátoru se experimentálně nastavili tak, aby zbytečně negenerovali velké buzení akční veličiny. Integrovaná složka v tomto případě není použita, protože se kinetická energie v systému nikam asymptoticky neakumuluje a regulační pochod by v každém případě skončil selháním.



Obrázek 17 - Regulace výchylky a polohy simulovaného systému

Při parametrizování se proporcionální složka postupně měnila tak, až by byla schopna sama o sobě regulovat polohu kyvadla co nejlíže nulové odchylky. Derivační složka se upravovala tak, aby způsobovala jen mírné houpání kolem žádané hodnoty a zbytečně nevybudila příliš velkou hodnotu akční veličiny, kde má pohon velmi nelineární chování.

V nejlepším případě se podařilo kyvadlo pomocí regulace udržet vzhůru po dobu přibližně půl vteřiny.



Obrázek 18 - Graf z výstupu simulace

Z grafu simulace je vidět, že regulace funguje nejlépe při co nejmenší odchylce žádané hodnoty. Pokud se ale začne zvětšovat, motor nemá dostatečné zrychlení, aby se mu podařilo pádu kyvadla zabránit, a to i přes to, že dosahuje svého maximálního

zrychlení a neuvažují se přitom ztráty kroků motorku. Tomu nasvědčuje i průběh dráhy vozíku, který se pohybuje skoro výhradně stejným směrem jako padající kyvadlo. Tímto způsobem by tak dorazil ke konci pojezdu.

Po připojení vnější regulační smyčky polohy se výsledek simulace příliš nezmění. V prvních okamžicích sice funguje relativně dobře, ale po oddálení vozíku od referenční hodnoty převládne rychlejší vnitřní regulační smyčka.

4.3 Regulace reálného systému

Při simulaci se dala zanedbat spousta věcí, které však při řízení skutečného systému budou mít zásadní vliv. Mezi ně patří omezená dynamika pohonu, která bude způsobovat ztrátu kroků. Krom zkrácení informace o aktuální poloze to bude mít vliv na samotný pochod regulačního procesu. V momentě ztráty několika kroků za sebou totiž bude vozík na malý okamžik stát, kdežto kyvadlo se bude dále pohybovat. Způsobí to pak velké skoky akční veličiny, které regulaci zhorší.

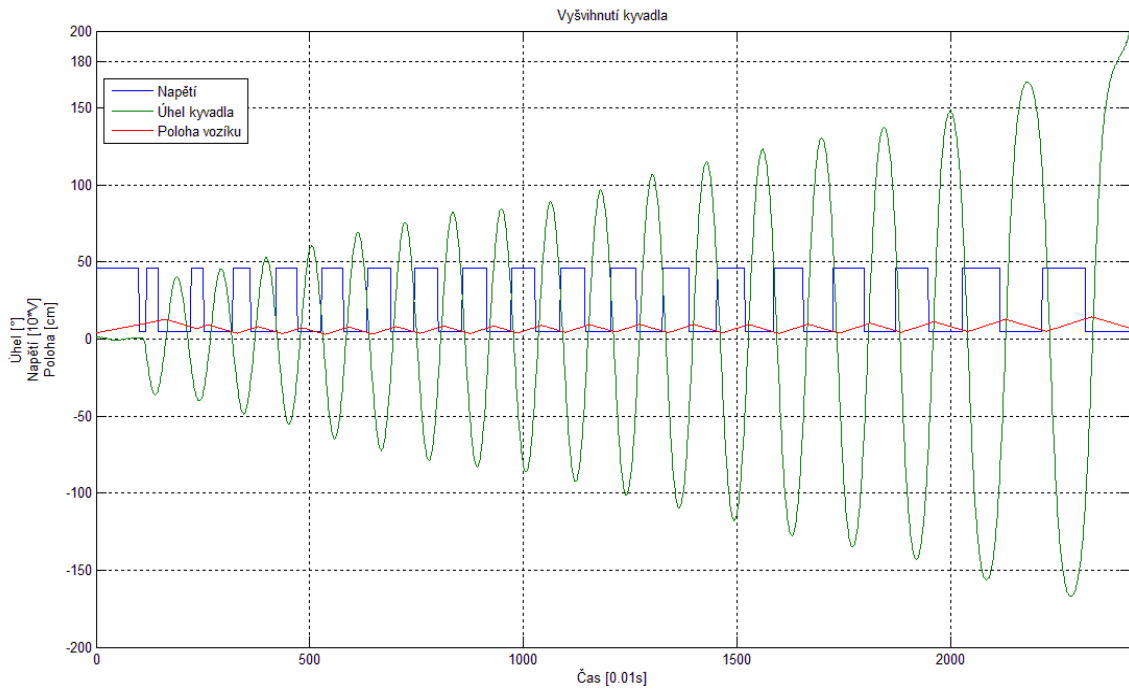
Aby se těmto případům předešlo, musela velikost i rychlost změny akční veličiny oproti simulaci omezena. Zlepší se tím trochu i linearita řízení.

4.3.1 Vyšvihnutí kyvadla

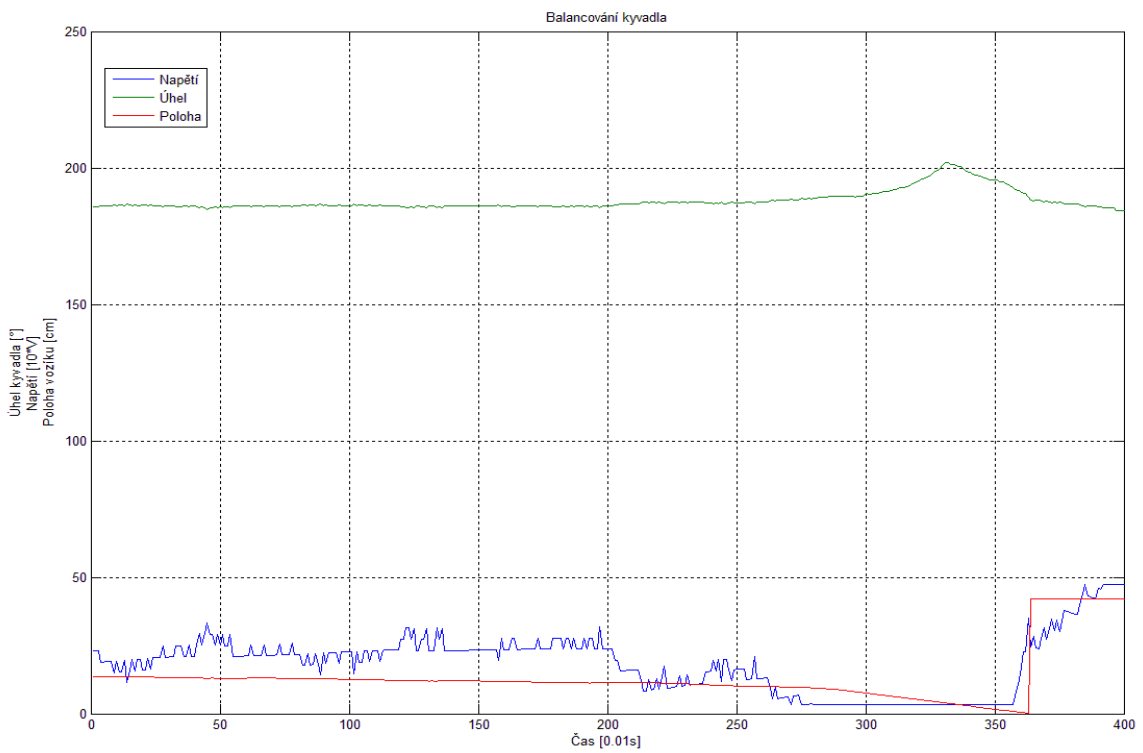
Pro vyhoupení kyvadla vzhůru je potřeba mu dodat dostatečnou energii. Ta se při dostatečném výkonu pohonu dá dodat v krátkém čase. Pokud tomu tak není, musí se energie kyvadlu přidávat postupně jeho rozhoupáním. Nejvíce energie se vygeneruje při maximální skokové změně zrychlení, když kyvadlo prochází nulovou hodnotou. Největší změna zrychlení nastane, pokud v daném okamžiku změníme co nejrychleji směr pohybu vozíku.

V tomto případě se musí maximální rychlost omezit tak, aby ji pohon dokázal docílit beze ztráty krok. Čas, který je pak potřeba k docílení vyhoupení se tím sice prodlouží, nicméně se nezkreslí aktuální poloha vozíku. Nenastane pak případ, kdy se po rozhoupání ocitneme u jednoho z okrajů pojezdu.

Nejsložitějším úkolem této akce je, aby se po vyhoupení do svislé polohy kyvadlo pohybovalo co nejmenší rychlostí. Je to nutné hlavně kvůli zvolenému způsobu řízení pomocí PID regulátoru.



Obrázek 19 - Graf výstupu regulace vyšvihnutí kyvadla



Obrázek 20 - Graf výstupu regulace polohy kyvadla

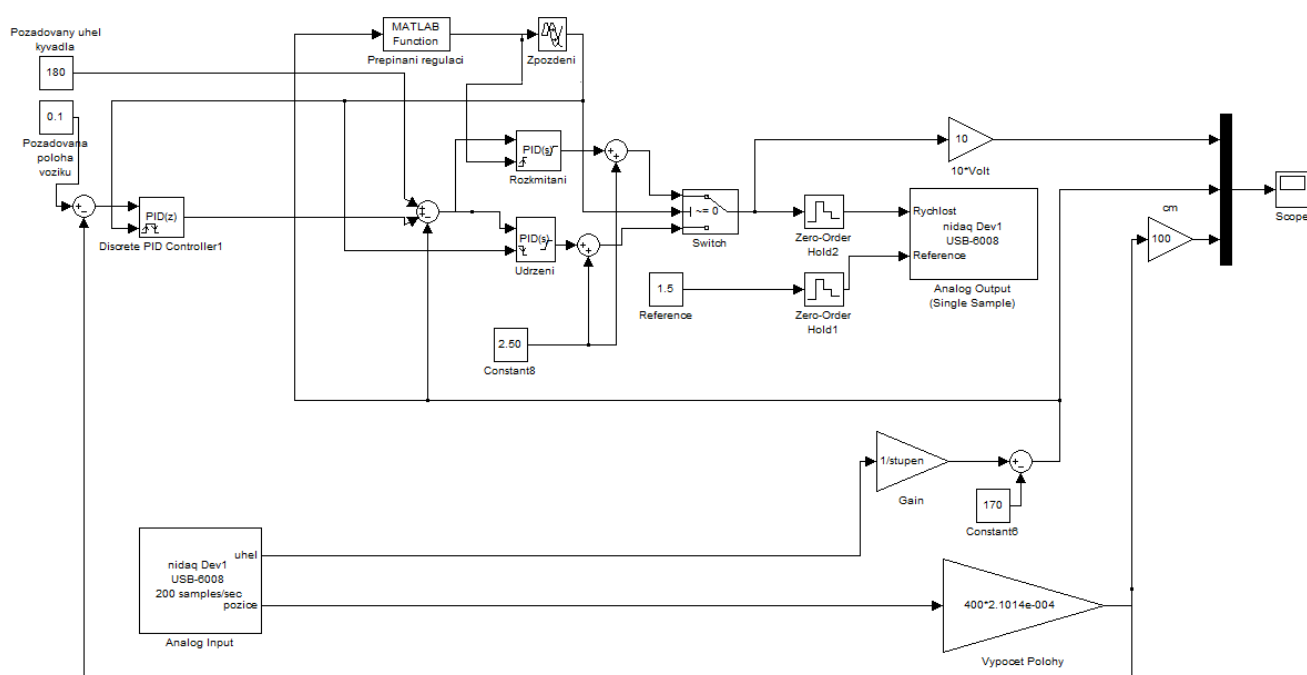
4.3.2 Balancování

Nastavení regulátoru pro balancování bylo provedeno velmi obdobně jako při simulaci. Jediným větším rozdílem bylo to, že se musela snížit maximální rychlost pohonu, protože docházelo k velké ztrátě kroků.

Zlepšila se tak linearita řízení, což oproti simulaci zlepšilo celkový výsledek. Nicméně chování jako takové zůstalo stejné. Zrychlení ani délka dráhy nebyli dostatečné, aby zachránili kyvadlo před pádem při větší odchylce.

4.3.3 Vyhoupnutí a následné balancování

K úloze, kdy na sebe úkol vyhoupnutí a balancování plynule navazují, je potřeba dvou regulátorů, které se ve správném momentě musí přepnout.



Obrázek 21 - Regulace systému skutečného kyvadla

V případě řízení balancování pomocí PID je potřeba, aby kyvadlo bylo v co největším klidu. Aby se úhlová rychlost kyvadla co nejvíce blížila k nule.

Přepnutí se tedy provede pár stupňů před dosažením rovné svislé polohy, kde se definovanou chvíli počká na ustálení přechodového děje. Čas čekání byl zjištěn experimentálně.

Tento způsob je však velmi citlivý na počáteční podmínky systému. Ty jsou v tomto případě nejvíce ovlivněny tuhostí převodu a celé konstrukce. Řízení by pro

správnou funkci muselo být velmi robustní. Právě proto se spojení těchto dvou úloh nepodařilo v praxi provést ani u jednoho z mnoha pokusů, aniž by byl výsledek uspokojivý. Ve většině případů se kyvadlo nepodařilo dostatečně zpomalit natolik, aby se přechodový děj ustálil dostatečně na to, aby druhý regulátor dokázal s kyvadlem alespoň chvíli balancovat.

5. Závěr

Práce se pokusila přiblížit vlastnosti systému inverzního kyvadla a řešení jeho regulování v určitých konfiguracích. Součástí bylo i sestavení a zprovoznění přípravku jako takového. Od přípravných prací, které bylo potřeba provést při vyjímání pohybové soustavy z inkoustové tiskárny, až po návrh elektronického obvodu, který zajišťuje pohyb původního krokového motoru. Vše bylo řešeno pomocí dostupných integrovaných obvodů a vlastních invencí, mezi něž se řadí i programování mikroprocesoru a definování jeho vlastností pro možnosti řízení soustavy. Využito bylo i sériové rozhraní, díky kterému se rozšířily možnosti pro zpracování analogových signálů jako prostředku ke komunikaci přípravku s ovládacím systémem. Krom toho i jako brána pro možné rozšíření současného systému.

Byla vytvořena simulace reálného systému. Vycházelo se jak z matematického popisu fyzikálního kyvadla, tak i z naměřených vlastností použitého pohonu. Výsledky simulace se sice parametricky lišily od reality, díky zanedbání některých jevů, které se nedají matematicky popsat, ale shodovaly se s výslednou možností ovládní systému skutečného inverzního kyvadla.

Možností této úlohy je její využití ve školní laboratoři jako demonstrace neobvyklých úloh v oboru automatického řízení. Poskytuje několik možností pohledů, přičemž zcela zásadní a zajímavé jsou úlohy vyhoupenutí a následné balancování inverzního kyvadla. K ovládní navíc slouží analogové vstupy a výstupy, pomocí nichž je soustavu možné řídit analogovou kartou připojenou k řídicímu systému.

Při pokusech o řízení tohoto systému bylo zjištěno několik nedostatků použité konzole tiskárny, které způsobily horší regulovatelnost systému. Jedná se hlavně o horší dynamiku původního krokového motoru, tak i o konstrukci, která byla stavěna na jiný druh namáhání. Nicméně v rámci možností byla provedena regulace pro úlohu rozhoupání kyvadla a jeho balancování pomocí PID regulátorů, které se mezi sebou automaticky přepínaly.

Seznam literatury a citací

1. Stabilization of an inverted pendulum using a printer. *YouTube*. [Online] 2010. [Citace: 25. února 2014.] <http://www.youtube.com/watch?v=gn6jr09K1xs>.
2. Inverted Pendulum: System Analysis. Control Tutorials for MATLAB and Simulink. [Online] 2012. [Citace: 10. května 2014.] <http://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?example=InvertedPendulum§ion=SystemModeling>.
3. Inverted pendulum. *Eteksiki.info*. [Online] 2012. [Citace: 26. února 2014.] <http://www.eteksiki.info/videos/inverted+pendulum>.
4. DIY control of Inverted Pendulum on Carriage. *YouTube*. [Online] 2010. [Citace: 26. února 2014.] http://www.youtube.com/watch?v=ET9iNasf_eE.
5. inverted pendulum. [Online] [Citace: 6. 4 2014.] <http://www.invertedpendulum.cz/>.
6. **Krishnavedala**. Inverted pendulum. [Online] wikipedia, 31. března 2014. [Citace: 6. dubna 2014.] http://en.wikipedia.org/wiki/Inverted_pendulum.
7. Inverted Pendulum: System Modeling. *Control Tutorials for Matlab & Simulink*. [Online] 2012. [Citace: 18. března 2014.] <http://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?example=InvertedPendulum§ion=SystemModeling#1>.
8. **Jeremic, Filip**. Derivation of Equations of Motion for. [Online] 28. listopadu 2012. [Citace: 15. března 2014.] <http://www.cas.mcmaster.ca/~qiao/courses/cs4xo3/presentations/InvPend.pdf>.
9. **Loflin, Lewis**. bristolwatch. *Electronics for students and hobbyist*. [Online] 2012. [Citace: 4. 3 2014.] http://www.bristolwatch.com/arduino/arduino_unipolar_stepper.htm.
10. PIC Microcontrollers - Programming in BASIC. *mikroe*. [Online] 2014. [Citace: 10. 5 2014.] <http://www.mikroe.com/chapters/view/76/pic-basic-book-chapter-3-pic16f887-microcontroller/>.
11. **Roubal, Jiří**. *Nelineární regulace kyvadla*. Praha : ČVUT, 2002.
12. **Quanser Inc**. *QNET Rotary Inverted Pendulum Trainer*. Ontario : Markham, 2001.
13. **HALVORSEN, HANS-PETTER**. *DAQ in MATLAB*. Porsgrunn, Norway : Faculty of Technology, 2012.

Přílohy

- 1) Schéma zapojení přípravku

Obsah CD

- 1) Složka s projektem ke schématu v programu EAGLE
- 2) Složka s projektem k mikroprocesoru
- 3) Zdrojové kódy do programu MATLAB
- 4) Tento dokument ve formátu .docx a .pdf

1) Schéma zapojení

