



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A
BIOMECHANIKY**

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

**ŘÍZENÍ LABORATORNÍHO MODELU INVERZNÍHO
KYVADLA**

CONTROL OF INVERTED PENDULUM MODEL

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Vít Zapletal

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Tomáš Spáčil

BRNO 2016

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student:	Vít Zapletal
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Tomáš Spáčil
Akademický rok:	2015/16

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

Řízení laboratorního modelu inverzního kyvadla

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se zabývá úpravou laboratorního modelu inverzního kyvadla, jedná se o soustavu se dvěma stupni volnosti. Poháněný je lineární posuv základny, úhel mezi kyvadlem a základnou je měřen inkrementálním enkodérem. Práce navazuje na bakalářskou práci Bradáč, M.: Konstrukce a výroba výukového modelu "Inverzní kyvadlo", bakalářská práce, 2009, VUT v Brně. Cílem je odstranění konstrukčních nedostatků vypořádaných v praxi (poskytne vedoucí), vývoj řídicího algoritmu a jeho implementace do mikrokotroléru pomocí automatického generování kódu.

Cíle bakalářské práce:

- 1) Seznámení se s modelem inverzního kyvadla, jeho současnými konstrukčními nedostatky a jejich náprava.
- 2) Realizace PID řídicího algoritmu, umožňujícího udržení kyvadla v nestabilní svislé poloze (pomocí karty MF624).
- 3) Vybrat vhodnou metodu a implementovat algoritmus přechodu ze stabilní do nestabilní svislé polohy, "swing-up" (pomocí karty MF624).
- 4) Implementace řídicího algoritmu do mikrokotroléru dsPIC.

Seznam literatury:

Valášek, M.: Mechatronika, Vydavatelství ČVUT 1995

Grepl, R.: Modelování mechatronických systémů v Matlab/SimMechanics, BEN, 2007

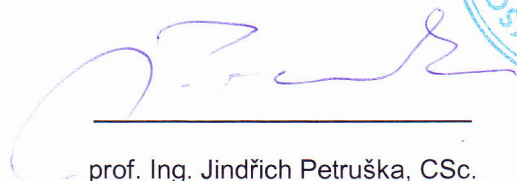
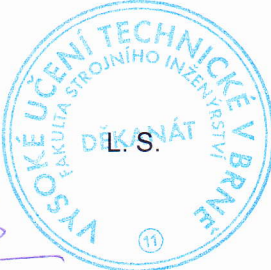
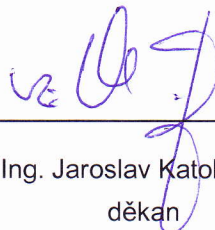
Kratochvíl, R.: Mechanika těles - dynamika, skriptum FSI VUT v Brně

K. J. Aström and R. M. Murray, Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers. Princeton University Press, 2008. Available online at <http://press.princeton.edu/titles/8701.html>

Bradáč, M.: Konstrukce a výroba výukového modelu "Inverzní kyvadlo", bakalářská práce, 2009, VUT v Brně

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16.

V Brně, dne 18. 12. 2015

		
_____ prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc. ředitel ústavu		_____ doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D. děkan

Abstrakt

Tato práce navazuje na bakalářskou práci Bradáč, M.: Konstrukce a výroba výukového modelu "Inverzní kyvadlo". Zabývá se analýzou závad a konstrukčních nedostatků inverzního kyvadla a následně jejich řešením. Dále text popisuje vývoj řídicího algoritmu v programu Matlab/Simulink. Závěrem práce je automatické vygenerování kódu a řízení modelu inverzního kyvadla pomocí mikrokontroléru.

Abstract

This thesis is connected to bachelor thesis of Bradáč, M.: Design, production and testing of education model "Inverted pendulum". It deals with analysis of faults and construction imperfections and subsequently their solutions. It further describes development of control algorithm in Matlab/Simulink. The end is dedicated to automatic code generation and inverted pendulum control by microcontroller.

Klíčová slova

Inverzní kyvadlo, karta MF624, PID regulace, dsPIC, Kerhuel toolbox

Keywords

Inverted pendulum, MF624 card, PID control, dsPIC, Kerhuel toolbox

Bibliografická citace

ZAPLETAL, V. *Řízení laboratorního modelu inverzního kyvadla*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 38 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Tomáš Spáčil

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně podle pokynů vedoucího bakalářské práce a že jsem uvedl všechny použité zdroje a literaturu.

V Brně dne.....

.....
Vít Zapletal

Poděkování

Především bych rád poděkoval vedoucímu práce Ing. Tomáši Spáčilovi za jeho rady, připomínky a čas, který do mě vložil. Dále chci vyjádřit své díky celému Mechlab týmu za jeho ochotu a svým blízkým za nekonečnou podporu.

Obsah

1.	Úvod.....	9
2.	Formulace problému a cíle řešení	10
3.	Rešeršní část.....	11
3.1	Regulátor	11
3.2	PID regulátor	11
3.3	Swing-up.....	12
3.4	Mikrokontrolér	12
3.4.1	dsPIC	12
3.5	Kerhuel toolbox	13
4.	Původní stav modelu.....	14
4.1	Konstrukce.....	14
4.2	Pohonná Soustava.....	14
4.3	Enkodéry.....	15
4.4	Elektronika	16
4.4.1	Řídící elektronika	16
4.4.2	Výkonová elektronika	16
5.	Analýza problému.....	17
5.1	Pohonná soustava	17
5.2	Kabel enkodéru kyvadla	17
5.3	Chybné počítání natočení kyvadla a motoru.....	18
5.4	Moment setrvačnosti kyvadla	18
5.5	Referenční bod.....	18
6.	Metody řešení konstrukčních nedostatků, jejich volba a realizace	19
6.1	Pohonná soustava	19
6.2	Výběr ozubeného kola a hřebene.....	22
6.3	Úprava kabeláže	23
6.4	Zvýšení momentu setrvačnosti	24
6.5	Vytvoření absolutní reference.....	24
6.6	Redukování chybného měření natočení kyvadla a motoru	25
7.	Realizace procesu řízení.....	27
7.1	Reference.....	27
7.2	Swing-Up regulace	27
7.3	PID regulace	28
7.4	Periferie a bezpečnost.....	29
8.	Řízení pomocí mikrokontroléru	31
8.1	Zapojení periférií	31
8.2	Automatické generování kódu.....	31
8.3	Kompilace kódu a programování mikrokontroléru	32
9.	Prezentace výsledků.....	33
9.1	Průběh polohy jezdce na trati	33
9.2	Swing-up	33
9.3	Průběh vychýlení kyvadla	34
10.	Závěr.....	35
11.	Literatura a použité zdroje	36
12.	Seznam obrázků, grafů a tabulek	37
13.	Seznam použitých symbolů	39
14.	Seznam příloh	40

1. Úvod

Téměř vždy po mé odpovědi na otázku, tématu mé bakalářské práce následovala otázka co to vůbec inverzní kyvadlo je. Lze si ho představit jako kyvadlo, které místo pohybu kolem dolní stabilní polohy provádí pohyb kolem horní nestabilní polohy. Jako děti jsme zkoušeli vybalancovat zavřený deštník ve vzpřímené poloze na otevřené dlani, jedná se o totožný problém, jen dvojrozměrný, kyvadlo představuje dřevěnou, volně rotující tyč, která je umístěna na jezdcí, s tím lze pomocí ozubeného řemene připevněného na motor pohybovat. Samotné inverzní kyvadlo uplatnění v praxi nenajde a slouží pouze jako edukativní nástroj, avšak princip řízeného držení v nestabilní poloze lze pozorovat například na dvoukolem vozítku Segway, nebo na raketách Falcon 9 společnosti SpaceX, které jsou schopné po oddělení od modulu opět přistát na zemi

Tato práce navazuje na bakalářskou práci M. Bradáče z roku 2009 [1], kdy bylo zařízení zkonstruováno, tehdy určeno pouze jako edukativní nástroj pro studenty. V roce 2015 se o jeho oživení pokusil A. Sukovatý[2], bohužel práci nestihl, z důvodu konstrukčních nedostatků a závad, dokončit.

Práce se zabývá přípravou inverzního kyvadla na budoucí autonomní provoz, ideálně bez jakýchkoliv servisních zásahů. Přípravou se rozumí vytvoření řídicího algoritmu v programu Matlab-Simulink pro držení v nestabilní poloze a tzv. swing-up nebo-li „vyšvihnutí“ kyvadla z dolní stabilní polohy do horní nestabilní polohy, toto řízení aplikovat v původním stavu inverzního kyvadla, dále pak analýza a náprava konstrukčních nedostatků a neduhů, které vznikly provozem, nebo již při samotné konstrukci. Závěrem práce je implementace řídicího algoritmu na mikrokontrolér.

Téma jsem si vybral z důvodu reálnosti a zajímavosti problematiky. Na výsledky praktické práce se člověk může opravdu podívat a sáhnout si na ně, nemluvě o pocitu, že svému okolí skutečně něčím přispěl. Dalším důvodem byla všeobecnost problému, objevuje se v něm jak konstruování, tak elektrotechnika a řízení, oblasti, které se mi hodí jako základ do mého budoucího studia jakožto i seznámení s mechatronickou laboratoří.



Obrázek 1.1 Vozítko Segway



Obrázek 1.2 Přistání rakety Falcon 9

2. Formulace problému a cíle řešení

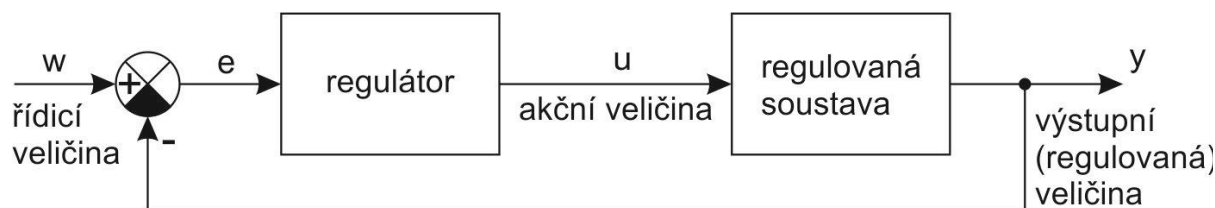
Cílem práce je uvést inverzní kyvadlo do stavu plně autonomního provozu, tak aby mohlo být vystaveno ve vitríně. Model k tomuto úkonu však nebyl vytvořen a tak je nutné jej přizpůsobit. Postup řešení lze rozdělit do několika skupin:

- Oživení kyvadla v původním stavu - vytvoření algoritmu řízení
- Analýza konstrukčních nedostatků
- Metody jejich nápravy
- Volba metody a její realizace
- Generování kódu a řízení pomocí mikrokontroléru

3. Rešeršní část

3.1 Regulátor

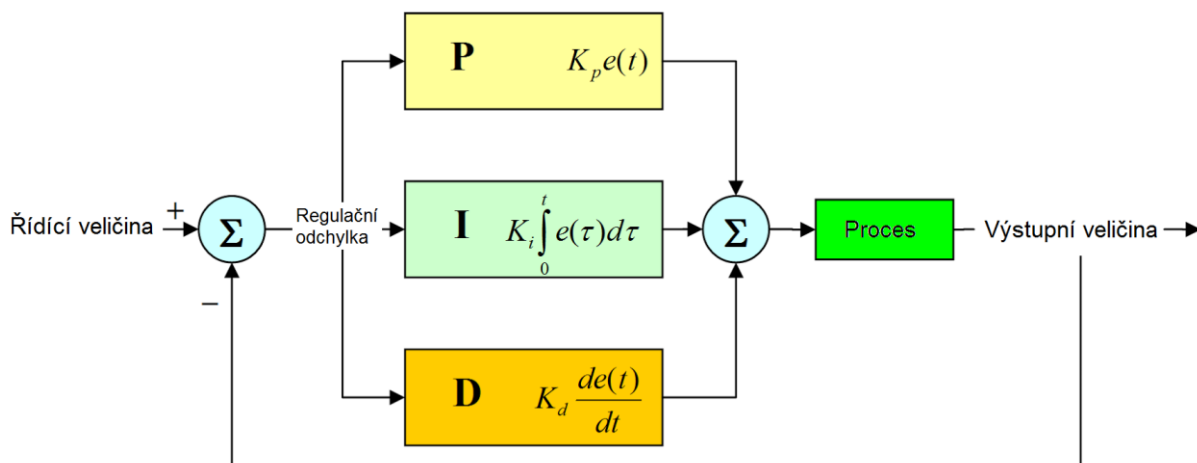
Princip zpětnovazebního řízení pomocí regulátoru je znázorněn na Obr. 3.1 „Regulační odchylka e se získá jako rozdíl řídicí veličiny - žádané hodnoty a regulované veličiny – skutečné hodnoty $e = w - y$. Na základě velikosti regulační odchylky a zvoleného řídicího algoritmu regulátor působí akční veličinou na regulovanou soustavu tak, aby byla dosažena na jejím výstupu požadovaná hodnota regulované veličiny y “.[3]



Obrázek 3.1 Řízení pomocí regulátoru

3.2 PID regulátor

PID je zkratka proporcionální, integrační a derivační složky, jejich součet pak reprezentuje regulátor.



Obrázek 3.2 PID regulátor

Proporcionální složka násobí regulační odchylku e konstantou K_p . Jejím úkolem je provést skokovou změnu.

Integrační složka integruje regulační odchylku e a následně ji násobí konstantou K_i . Používá se tam, kde je třeba odstranit konstantní regulační odchylku, nebo v případech kdy ze systému disipuje energie.

Derivační složka derivuje regulační odchylku e a následně ji násobí konstantou K_d . Má za úkol rychle reagovat na změnu, čím rychlejší změna je, tím je zásah derivační složky větší.

Není nutností použít všechny 3 složky, mnoho aplikací využívá jen PD nebo PI regulátor, v závislosti na typu soustavy. Hlavní výhodou PID regulátoru je jednoduchost a efektivita. [6]

3.3 Swing-up

Swing-up je termín pro „vyšvihnutí“ kyvadla z dolní rovnovážné polohy do horní nerovnovážné. V zásadě existují dvě metody jak swing-up provést a to Heuristická a Energická.

Heuristické řízení spočívá v pohybu vozíku opačným směrem, než je vychýlení kyvadla a změně směru ve chvíli kdy kyvadlo projde dolní polohou, systém tedy pohybuje vozíkem dopředu a dozadu, tím dodává kyvadlu energii k vyšvihnutí. To je však možné pouze, dokud kyvadlo nedosáhne horizontální polohy, poté již pohyb vozíku energii kyvadlu odebírá. Metoda je závislá pouze na úhlu natočení kyvadla a jejím výstupem je konstantní rychlost jezdce.

Energická metoda spočívá ve vytvoření matematického modelu energie kyvadla, závislé jak na natočení kyvadla, tak na jeho rychlosti, systém se pak snaží předat kyvadlu energii, která koresponduje s horní nestabilní polohou. Tato metoda je výhodnější pro swing-up na krátké dráze. Výstupem je proměnná rychlost jezdce.[4]

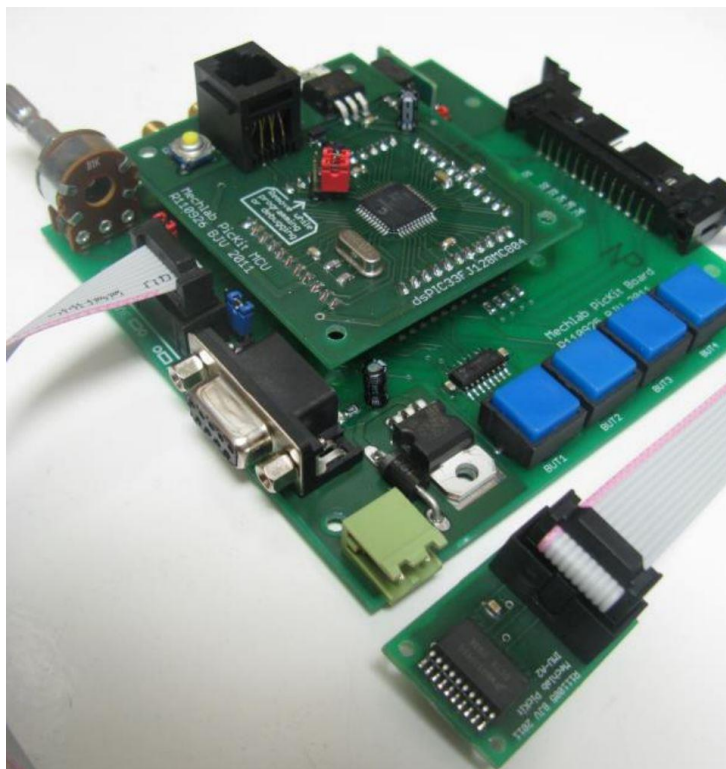
3.4 Mikrokontrolér

Mikrokontrolér je malý jednočipový počítač, právě rozměr je jedna z jeho velkých výhod, tou druhou je vysoká spolehlivost, hodí se pro řízení specifických úkonů. V dnešní době ho můžeme najít téměř ve všech elektronických zařízeních, od televizoru po pračku. Jeho cena se pohybuje v řádech stovek korun.[5]

3.4.1 dsPIC

Jedná se o mikrokontrolér firmy Microchip Technology, jsou navrženy pro zpracování digitálního signálu a uzpůsobeny ke zpracování velkého toku dat, mají také vysoký výkon v úlohách zpracování signálu.[7]

Kit, který je použit pro řízení inverzního kyvadla byl vytvořen mechatronickou laboratoří a skládá se ze dvou desek, horní desky se samotným mikrokontrolérem a dolní desky s konektory a tlačítky.



Obrázek 3.4.1 PIC Edu Kit

3.5 Kerhuel toolbox

Neboli Embedded Target for PIC je Simulinkovským blocksetem, který automaticky generuje C kód. Ten lze dále kompilovat a použít pro řízení mikrokontrolérů PIC.

4. Původní stav modelu

4.1 Konstrukce

Základem celého kyvadla je jeho rám, vyrobený z jaklového profilu na kterém je připevněno:

- Lineární vedení spolu se samotným jezdcem firmy Alurol
- Celá pohonná soustava
- Řemenicemi 21 T5/25 firmy Mateza



Obrázek 4.1 Rám inverzního kyvadla

4.2 Pohonná Soustava

Tažnou sílu zajišťuje stejnosměrný motor firmy Maxon označením RE35_118777

Parametry motoru:

Výkon	90 W
Nominální napětí	30 V
Maximální otáčky	8200 ot/min
Maximální krouticí moment	107 Nmm

Tabulka 4.2.1 Parametry RE35_118777

Motor je spojený s planetovou převodovkou GP 42C_203114 s převodovým poměrem 4,3:1 a doporučenými vstupními otáčkami >8000 ot/min.[8]



Obrázek 4.2.2 Klec s motorem a převodovkou

4.3 Enkodéry

Na soustavě se nacházejí dva rotační enkodéry.

Enkodér IRC 305-6000 KBT firmy LARM zajišťující měření ujeté vzdálenosti (dále jen „enkodér motoru“). [9]

Enkodér HEDL-5540-I13 firmy Avago zajišťující měření výchylky kyvadla (dále jen „enkodér kyvadla“).[10]

	Enkodér IRC 305-6000	Enkodér HEDL-5540-I13
Počet pulzů na otáčku	6000 tik/ot	512 tik/ot
Počet signálů	Dva základní a jeden nulovací	
Napájecí napětí	5 V	

Tabulka 4.3.1 Parametry enkodérů



Obrázek 4.3.2 Enkodér IRC 305-6000



Obrázek 4.3.3 Enkodér HEDL-5540-I13

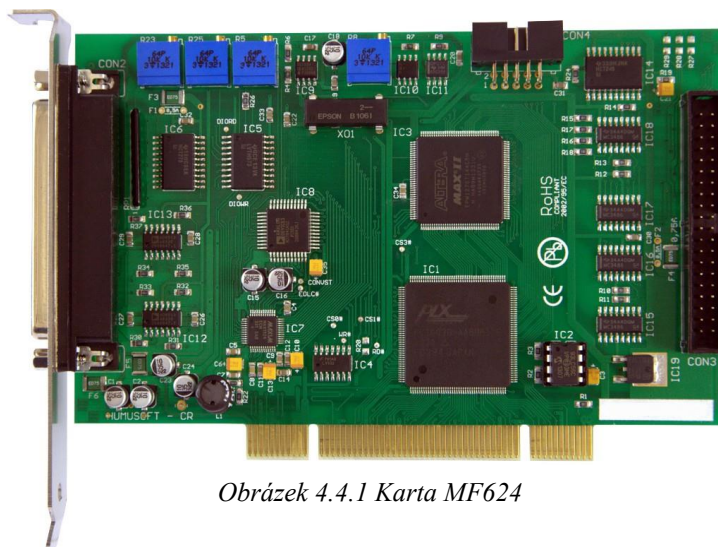
4.4 Elektronika

4.4.1 Řídící elektronika

Inverzní kyvadlo je řízeno modelem z programu Matlab-Simulink, vytvořeným pomocí Real-Time Windows Target toolboxem, aby mohl model v reálném čase analyzovat a řídit soustavu, musí zde být propojení mezi počítačem a inverzním kyvadlem, o to se stará karta MF624 firmy Humusoft, k ní jsou pomocí kabelu připojeny svorkovnice, ve kterých jsou vsazeny dráty od jednotlivých periférií. [11]

Karta obsahuje celé množství periférií:

- Analogové vstupy a výstupy
- Digitální vstupy a výstupy
- Časovače/Čítače
- Napájení 5V a 12V



Obrázek 4.4.1 Karta MF624

4.4.2 Výkonová elektronika

Karta MF624 nemůže napájet samotný motor, který potřebuje větší proud, proto je mezi ní a motorem další elektronický prvek, jednotka ISL Power Board R2.0 s H-můstkem, která obsahuje 2 obvody, signálový je připojen na MF624 a zpracovává signály o směru, střídě a brzdě, na základě těchto signálů řídí výkonový obvod, který napájí motor. Jedná se opět o zařízení vytvořené v mechatronické laboratoři.



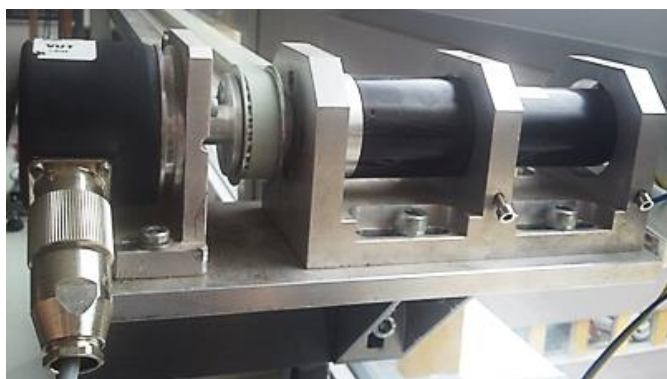
Obrázek 4.4.2 ISL Power Board R2.0

5. Analýza problému

Tato kapitola představuje všechny problémy, které velkým či malým dílem přispívaly k nestabilitě soustavy a tím ztěžují její regulovatelnost. Některé z nich byly vytvořeny již při samotném návrhu konstrukce, ve kterém ovšem autor nepočítal s něčím jako je swing-up a autonomní bezúdržbový provoz, jiné mohly vzniknout nešetrným zacházením a celkovým stárnutím komponentů.

5.1 Pohonná soustava

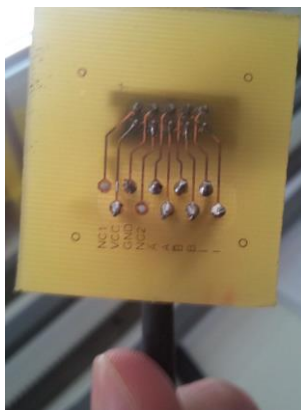
Přenos síly mezi motorem a jezdcem je zajištěn ozubeným řemenem. Toto řešení však pro autonomní provoz není příliš vhodné, neboť si žádá občasný servis v podobě napínání řemene. Předpětí řemene dále radiálně zatěžuje hřídel převodovky, neboť je uchycen přímo na ní. Dalším negativem by mohlo být stárnutí řemene a jeho citlivost na prostředí, tento fakt však závisí na umístění modelu, velkou váhu by měl například při provozu na přímém slunci. Nedostatky byly konzultovány i s A. Sukovatým, který na inverzním kyvadle pracoval v roce 2015, potvrdil, že se měření po delším časovém odstupu neshodovala a to právě z důvodu snížení velikosti předpětí.[12]



Obrázek 5.1 Pohonná soustava

5.2 Kabel enkodéru kyvadla

Vedení signálu z enkodéru kyvadla bylo velmi nevhodně řešeno. První část kabelu byla plochá, druhá část byla pružná. Spojení mezi nimi bylo realizováno na desce plošných spojů, která visela ve vzduchu, při každém pohybu tak hrozilo přerušení kontaktu. Kabel byl navíc nepřehledný, neboť obsahoval 10 žil, naše aplikace však vyžadovala pouze 4 a to napájení, zem, signál A a signál B.



Obrázek 5.2 Deska plošných spojů propojující kabely

5.3 Chybné počítání natočení kyvadla a motoru

Problém se projevoval špatným počítáním pulzů v jednom směru. Nejprve byl pozorován na enkodéru, který měří úhel natočení motoru, bylo usuzováno, že jde o závadu na motoru, totožný problém se však objevil i na enkodéru měřícím vychýlení kyvadla.

5.4 Moment setrvačnosti kyvadla

Kyvadlo v našem případě představuje dřevěná tyč o hmotnosti 36g. Jeho nízká hmotnost souvisí s malým momentem setrvačnosti, to zapříčiňuje větší náchylnost k rozkmitávání, ztěžuje regulaci a má velký vliv na swing-up.

5.5 Referenční bod

Model inverzního kyvadla postrádá jakoukoli referenci a před každým sepnutím se tedy musí jezdec umístit doprostřed dráhy, jinak by hrozilo jeho vyjetí.

Problém by také mohl nastat při náhlém výpadku proudu, po opětovném sepnutí by jezdec neznal polohu středu tratě.

6. Metody řešení konstrukčních nedostatků, jejich volba a realizace

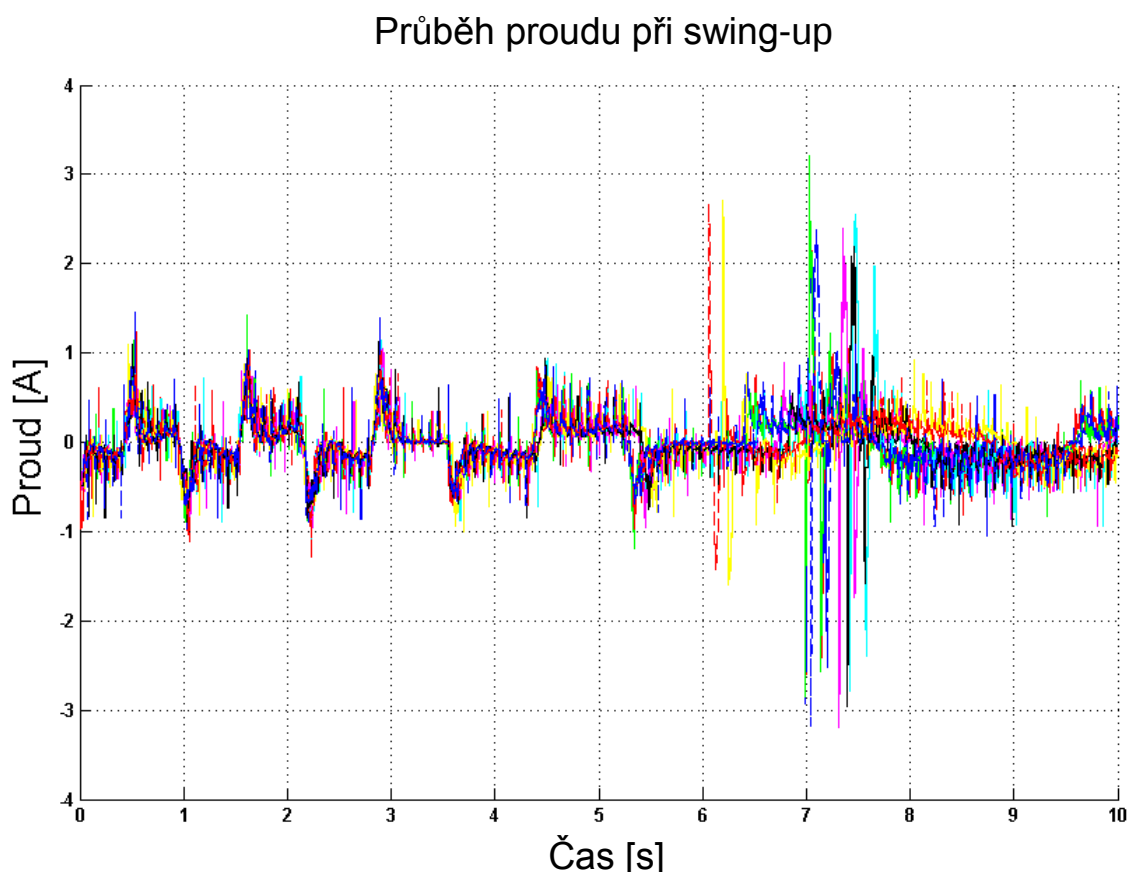
6.1 Pohonná soustava

Již od počátku práce byla cílem kompletní změna principu pohybu jezdce po dráze. Jako nabízená řešení se jevila:

- Lineární motor
- Pohybový šroub
- Pohyb po ozubeném hřebenu

Po analýze trhu a nákladů spojených s úpravou bylo rozhodnuto pro řešení s ozubeným hřebenem. Princip úpravy spočívá v přesunu motoru na jezdce. Pohyb je pak realizován tvarovým stykem mezi hřebenem uchyceným na rámu konstrukce a ozubeným kolem, které je připevněno na hřídeli převodovky pomocí svěrného pouzdra.

Prvním bodem bylo zjistit, zda lze tuto úpravu uskutečnit a vybrat malý a dostatečně silný motor, velikostně odpovídající jezdci. K tomu bylo třeba zjistit maximální moment, ten je lineárně závislý na proudu, pro objektivní výsledek bylo naměřeno 10 průběhů proudu.



Obrázek 6.1 Graf průběhu odebíraného proudu

Z měření vyplynulo, že nejvyšší naměřený proud se pohyboval kolem $I_{\max}=3$ A.

Tato hodnota byla však ojedinělou výchyldou, způsobenou akčním zásahem při přechodu na regulaci, běžně se proud pohyboval okolo 0,8 A.

Výpočet momentu:

M_{max}	[Nm]	...maximální moment
M_{nom}	[Nm]	... nominální moment
I_{max}	[A]	...maximální proud
I_{nom}	[A]	...nominální proud
Kr	[Nm/A]	...momentová konstanta motoru
i	[-]	...převodový poměr

Vzorec pro výpočet momentu v závislosti na proudu

$$M = I * Kr * i \quad (1)$$

$$I_{max} = 3 \text{ A}$$

$$I_{nom} = 0,8 \text{ A}$$

$$i = 4,3$$

$$Kr = 0,0389 \text{ Nm/A}$$

Dosazení

$$M_{max} = 3 * 0,0389 * 4,3 = 0,5 \text{ Nm} \quad (1)$$

$$M_{nom} = 0,8 * 0,0389 * 4,3 = 0,13 \text{ Nm} \quad (1)$$

Následný výběr motoru s převodovkou nebyl snadný, většina motorů s dostatečným momentem neměla dostatečné otáčky.

V potaz se samozřejmě bral i fakt, že váha jezdce se s usazením motoru zvýší.

V závislosti na těchto faktech byl vybrán stejnosměrný motor firmy Transmotec s označením PD 4266-24-4, jehož součástí je i převodovka s převodovým poměrem 4:1 a rotační enkodér s Hallovými senzory, disponující 38 tiky na otáčku.

Vlastnosti pohonné soustavy:

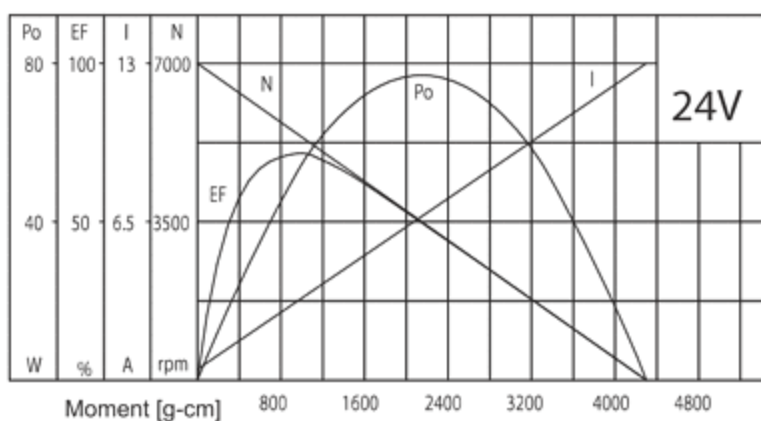
Výkon	34.7 W
Jmenovité napětí	24 V
Jmenovité otáčky	1445 ot/min
Jmenovitý krouticí moment	0.18Nm

Tabulka 6.12 Vlastnosti pohonné soustavy motoru PD 4266-24-4. [13]



Obrázek 6.1.3 Stejnosměrný motor PD 4266-24-4 s převodovkou a enkodérem

Jmenovitý kroutící moment sice nedosahuje 0,5 Nm, ale z charakteristiky motoru lze zjistit, že pohonná soustava tento moment vytvořit zvládne a při krátkodobém působení motor neničí.



Obrázek 6.1.4 Charakteristika motoru PD 4266-24-4

Charakteristika motoru je bez převodovky, proto je nutné naši hodnotu přepočítat.

M_{maxM} [Nm] ...maximální moment motoru

Eff [%] ...účinnost

Vzorec pro výpočet momentu samotného motoru

$$M_{maxM} = \frac{M_{max}}{i * Eff} \quad (2)$$

$$i = 4$$

$$M_{max} = 0,5 \text{ Nm}$$

$$Eff = 80 \%$$

Dosazení

$$M_{maxM} = \frac{0,5}{4*0,8} = 0,156Nm = 1590g/cm \quad (2)$$

Tento moment byl třeba pro provoz soustavy v původním stavu, v obrázku 6.1.4 lze pozorovat, že se nacházíme zhruba v polovině charakteristiky motoru, předpokladem tedy bylo, že síla bude dostatečná i v případě těžšího jezdce.

6.2 Výběr ozubeného kola a hřebene

Bylo zvoleno plastové ozubené kolo P1035 a ocelový hřeben 112000 ST firmy Teatechnik. Kombinace ocel-plast je vhodná zejména z bezúdržbových důvodů, není totiž nutné ji mazat.

Protože pracovní oblast jezdce je hlavně uprostřed dráhy, bylo třeba v tomto místě zjistit průhyb hřebene.

Výpočet průhybu:

y_{max}	[m]	...maximální průhyb
l	[m]	...délky hřebene
q	[N/m]	...liniové zatížení
E	[GPa]	...průřezový modul
J	[mm ⁴]	...kvadratický moment průřezu
h	[mm]	...výška průřezu hřebene
b	[mm]	...šířka průřezu hřebene
m	[kg]	...průřezový modul
g	[m/s ²]	...gravitační zrychlení

Vzorec pro maximální průhyb nosníku při liniovém zatížení po celé délce

$$y_{max} = \frac{5*q*l^4}{384*E*J} \quad (3)$$

Vzorec pro kvadratický moment obdélníkového průřezu

$$J = \frac{b*h^3}{12} \quad (4)$$

Hřeben je zatěžován pouze gravitační silou, ta byla aproximována liniovým zatížením

$$q = \frac{m*g}{l} \quad (5)$$

$$L = 1,5 \text{ m}$$

$$E = 209 \text{ GPa} = 209*10^9 \text{ Pa}$$

$$h = 7,75 \text{ mm} = 0,00775 \text{ m}$$

$$b = 10 \text{ mm} = 0,01 \text{ m}$$

$$m = 1,125 \text{ kg}$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

Dosazení

$$q = \frac{1,125 \cdot 9,81}{1,5} = 7,36 \text{ N/m} \quad (5)$$

$$J = \frac{0,01 \cdot 0,00775^3}{12} = 3,879 \cdot 10^{-10} \text{ m}^4 \quad (4)$$

$$y_{\max} = \frac{5 \cdot 7,36 \cdot 1,5^4}{384 \cdot 209 \cdot 10^9 \cdot 3,879 \cdot 10^{-10}} = 5,98 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 5,98 \text{ mm} \quad (3)$$

Z výsledku plyne, že se hřeben prohne o necelých 6 mm, tím by se však kompletně vytratil jeho kontakt s ozubeným kolem, proto bylo nutné do prostřední části přidat podporu.

6.3 Úprava kabeláže

Jelikož byla po úpravě na jezdcí, kromě enkodéru kyvadla, připevněna i pohonná jednotka, bylo třeba vést k jezdcí celkem 8 kabelů starajících se o chod enkodérů a 2 silové pro pohon motoru. Dostupné metody vedení byly:

- Spirálové kabely
- Klasické kabely
- Energické řetězy

Nejvhodnějším řešením se pro svoji pružnost zdál spirálový kabel.

Po přesunu motoru na jezdcí byla vytvořena prozatímní kabeláž z klasických barevných drátů. Cílem bylo ji na konci práce vyměnit za výše zmíněný spirálový kabel, to však z důvodu časové tísně nebylo splněno.

Tabulka zapojení:

Žlutý kabel č.1	Signál A	Enkodér kyvadla
Červený kabel č.1	Signál B	
Černý kabel č.1	Napájení 5V	
Modrý kabel č.1	Zem	
Žlutý kabel č.2	Signál A	Enkodér motoru
Červený kabel č.2	Signál B	
Černý kabel č.2	Napájení 5V	
Modrý kabel č.2	Zem	

Tabulka 6.3. Tabulka zapojení

6.4 Zvýšení momentu setrvačnosti

Zvýšením momentu setrvačnosti bylo možné dosáhnout zvýšením:

- Hmotnosti kyvadla
- Délky kyvadla

Zvýšením délky kyvadla z důvodu nárazů do rámu nebylo možné, proto bylo dřevěné kyvadlo nahrazeno hliníkovým o váze 113g. Zároveň bylo kyvadlo zkráceno a tím maximalizována pracovní oblast, neboť dále nedocházelo ke kontaktu s dolní částí konstrukce rámu.

6.5 Vytvoření absolutní reference

Řešením problému absolutní reference se nabízely:

- Indukční koncové spínače
- Tlačítkové koncové spínače

Z důvodu rozsáhlosti úprav rámu byla zvolena varianta indukčních koncových spínačů na krajích dráhy, neboť stačilo koncové spínače vložit do vyvrtaných děr. Kyvadlo tak po každém sepnutí najede na spínač a okamžitě zná svoji absolutní polohu.

Použita byla indukční čidla LR08BF02DPOY-E1 M8.

Vlastnosti:

Napájecí napětí	10-30 V
Dosah	Až 2 mm v závislosti na materiálu

Tabulka 6.5.1 Parametry koncového spínače [14]



Obrázek 6.5.2 Koncový spínač



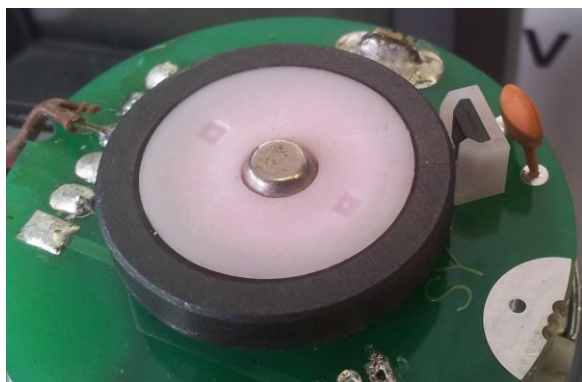
Obrázek 6.5.3 Uložení koncového spínače

Toto čidlo je NC neboli normally closed, to znamená, že posílá ve volném stavu signál o 0V a v sepnutém stavu 12V. Jelikož byly senzory napájeny z vlastního zdroje napětí, bylo nutné signál galvanicky oddělit od signálového obvodu mikrokontroléru. To bylo realizováno optočleny PC817B.

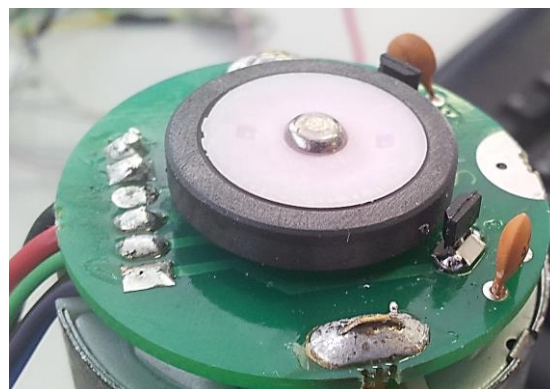
6.6 Redukování chybného měření natočení kyvadla a motoru

V původním stavu byl tento neduh vyřešen RC filtry na vstupu signálu do svorkovnice.

Po konstrukční úpravě se ovšem objevil jiný problém, signál enkodéru nového motoru měl méně než 3.3 V a tak řídicí elektronika vůbec nezaznamenala změnu polohy, to bylo způsobeno vadnými Hallovými senzory, problém byl vyřešen jejich výměnou.



Obrázek 6.6.1 Původní Hallův senzor



Obrázek 6.6.2 Nový Hallův senzor: TLE4945L

Dále se po úpravě objevil problém s počítáním tiků enkodéru na kyvadle, zdálo se, jako by na kabelech signálu bylo indukováno napětí od ostatních kabelů, jak bylo později zjištěno, tento fakt za špatným počtem nestál. Problém byl nakonec redukován nastavením filtru v bloku enkodéru, nadále se chyba pohybovala jen v rozmezí $\pm 0.3^\circ$, což se dá pokládat za dostatečnou přesnost. Bohužel se za celou dobu práce nepodařilo odhalit přesnou příčinu problému, pravděpodobně za ním však stál indukovaný napěťový šum.

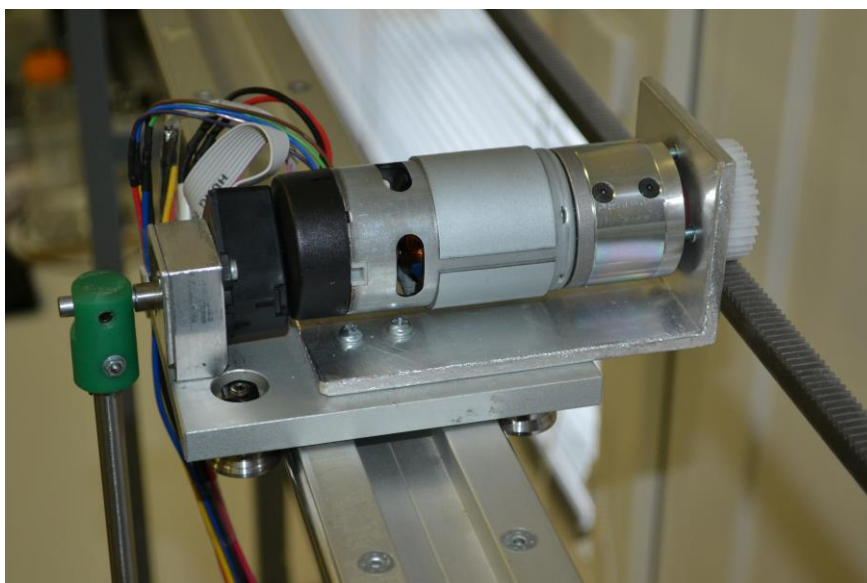
Celková změna modelu inverzního kyvadla je patrná již od pohledu.



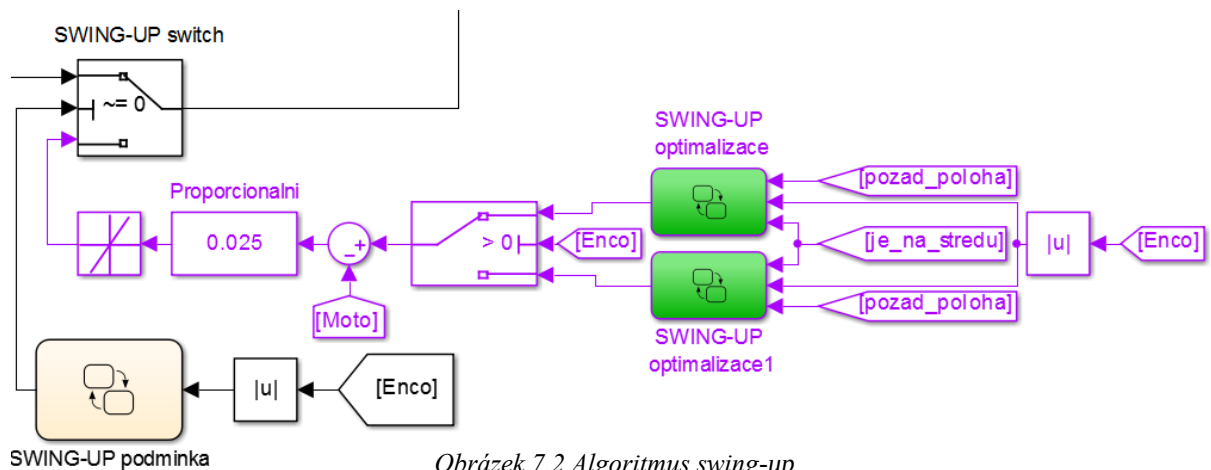
Obrázek 6.6.3 Model inverzního kyvadla v původním stavu



Obrázek 6.6.4 Model inverzního kyvadla po úpravě



Obrázek 6.6.5 Model inverzního kyvadla po úpravě, detail jezdce



Obrázek 7.2 Algoritmus swing-up

V momentě, kdy se kyvadlo přiblíží na 4° od vertikální polohy swing-up podmínka přepne switch a začne vyvažování kyvadla.

7.3 PID regulace

Pro udržení kyvadla v nestabilní poloze byly použity dva regulátory.

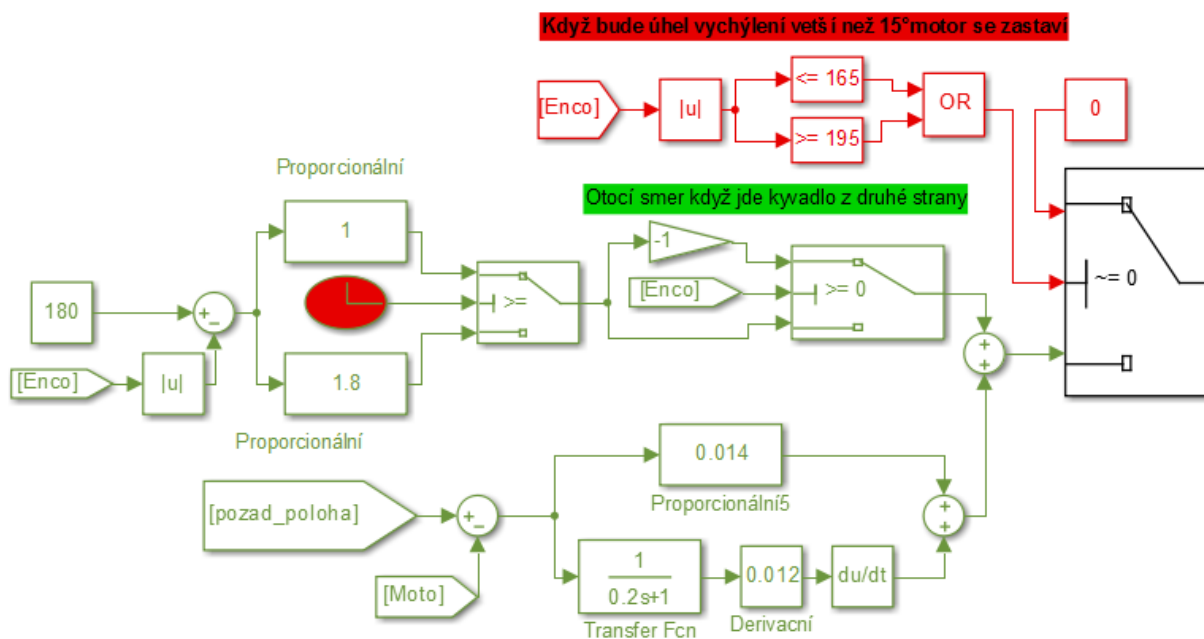
První z nich se stará o to, aby kyvadlo zůstalo ve svislé poloze, k tomu stačila proporcionální složka. Její velikost nebylo snadné zvolit, velká složka zachytí kyvadlo po swing-up, avšak po ustálení se projevuje trhavými pohyby. Malá složka nezpůsobuje trhavé pohyby, ale má problém se zachycením kyvadla po vyšvihnutí. Funkčním řešením se ukázalo přidání časovače, který v době, kdy je již kyvadlo v nestabilní poloze sníží proporcionální složku.

Druhý regulátor je proporcionálně-derivační a stará se o pozici jezdce, bez něj by jezdec vyjel z dráhy. Následně se akční zásahy jednotlivých regulátorů sečtou.

Samotné nastavení jednotlivých složek regulátoru bylo provedeno metodou pokus-omyl, tato metoda spočívá ve volbě hodnoty konstanty a následném porovnání tvaru odezvy na skok v požadované hodnotě a podle toho se volí její vhodnost. [6]

Existují i analytické přístupy volby konstant jako například metoda Ziegler-Nichols. Tato metoda však spočívá v rozkmitání regulované soustavy kolem požadované hodnoty, což v našem případě není realizovatelné, neboť není možné kyvadlo rozkmitat kolem nestabilní polohy.

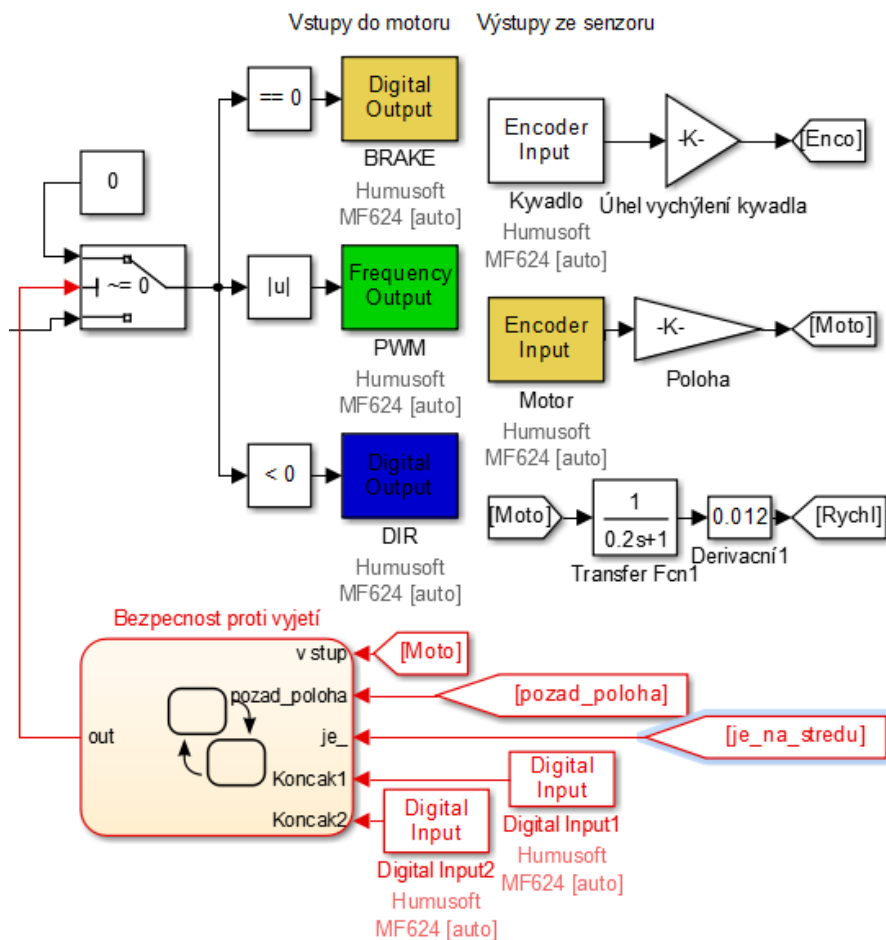
Větev obsahuje i bezpečnostní prvek, který vypne motor v případě kdy je kyvadlo vychýleno o více než 15° , zabrání tak jezdcí ve velkém pojezdu, na který by délka tratě nestačila.



Obrázek 7.3 Algoritmus vyvažování v nestabilní poloze

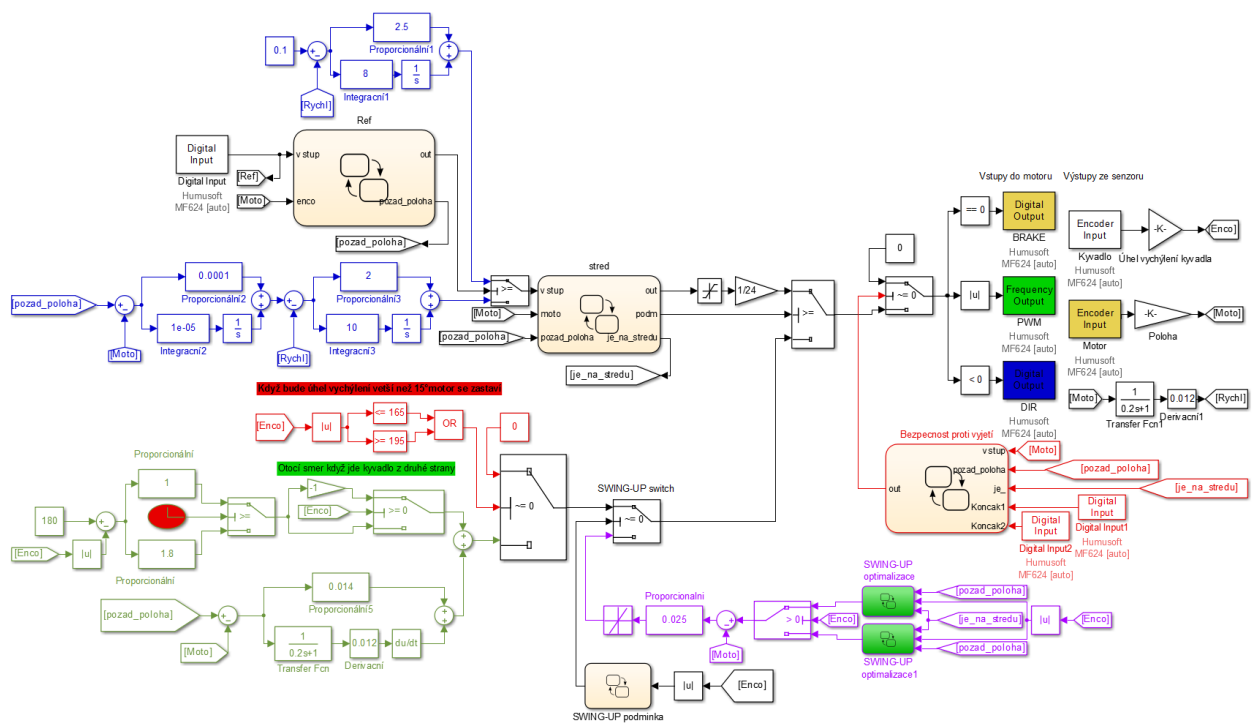
7.4 Periferie a bezpečnost

Algoritmus obsahuje bezpečnostní podmínku, která po překročení vymezené vzdálenosti, nebo přejezdu koncového spínače zastaví motor.



Obrázek 7.4.1 Periferie a bezpečnost proti vyjetí z dráhy

Výsledný řídicí algoritmus složený ze všech výše popsaných částí pak vypadá takto:



Obrázek 7.4.2 Algoritmus řízení modelu inverzního kyvadla

8. Řízení pomocí mikrokontroléru

Jelikož cílem této práce bylo připravit kyvadlo na provoz ve veřejných prostorách školy, nebylo možné, aby bylo nadále řízeno pomocí karty MF624, proto byla posledním bodem této práce implementace řídicího algoritmu na mikrokontrolér.

Aby mohlo být inverzní kyvadlo řízeno mikrokontrolérem, bylo nutné řídicí algoritmus přeložit do strojového jazyka, tento překlad velmi usnadňuje automatické generování kódu.

Samotný proces řízení pomocí mikrokontroléru se skládá z několika částí:

- Zapojení mikrokontroléru
- Automatické generování kódu
- Kompilace kódu
- Programování mikrokontroléru

8.1 Zapojení periférií

Mikrokontrolér obsahuje celkem 44 pinů, z nichž každý má jinou funkci, zapojení bylo provedeno podle datasheetu PICeduKitu.[15]

Číslo pinu	Název pinu	Připojený kabel
3	RC7	PWM
2	RC6	DIR
1	RB9	DIS
12	RA10	Koncový spínač 1
13	RA7	Koncový spínač 2
33	BUT1	Tlačítko 1
41	RB5	Enkodér kyvadla A
42	RB6	Enkodér kyvadla B
43	RB7	Enkodér motoru A
44	RB8	Enkodér motoru B
6	Vss	GND

Tabulka 8.1 Zapojení kabelů do eduKitu

8.2 Automatické generování kódu

Prvním bodem byla úprava samotného programu, bloky periférií v Matlab/Simulink bylo nutné nahradit bloky mikrokontroléru z MPLAB Device Blocks knihovny. Jelikož mikrokontrolér pracuje pouze s diskrétní logikou, bylo nezbytné nahradit všichni continues bloky diskrétními a upravit signál vstupující do bloků ovládajících motor. Výstupem procesu automatického generování je C kód.

Tabulky odpovídajících bloků:

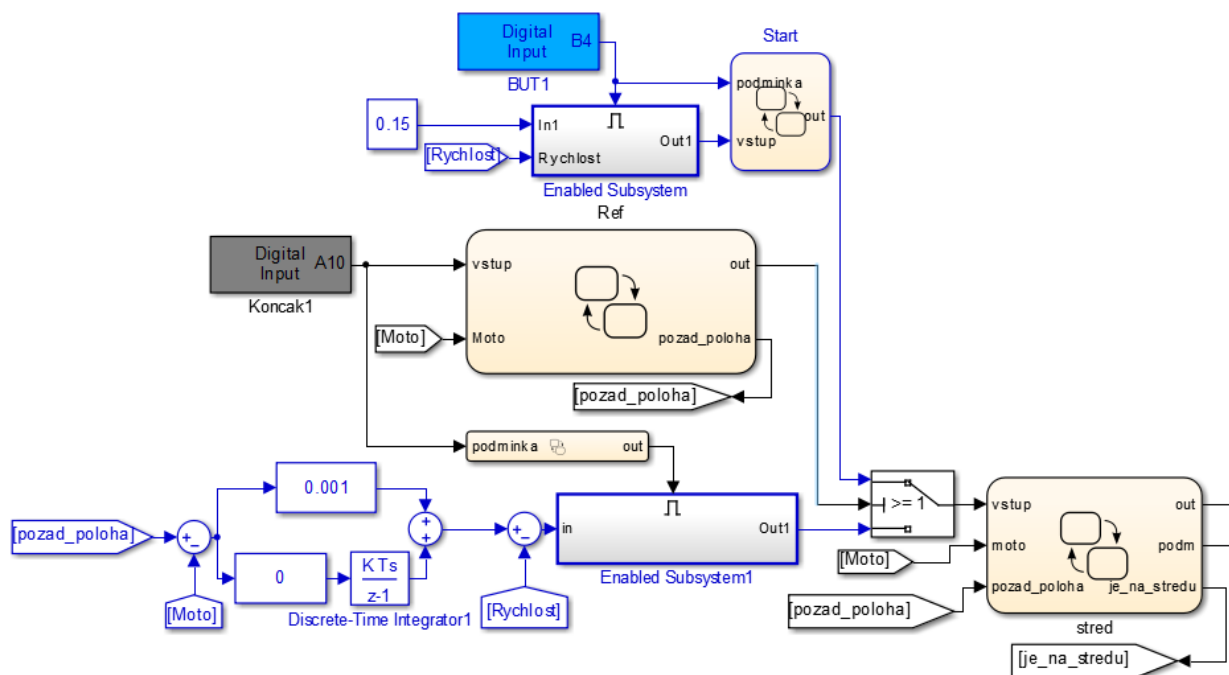
Odpovídající funkce	Bloky Real-time windows target	Bloky mikrokontroléru
Digitální výstup	Digital output	Digital output
Digitální vstup	Digital input	Digital input
PWM	Frequency output	Output compare HW
Výstup enkodéru	Encoder input	QEI

Tabulka 8.2.1 Bloky mikrokontroléru odpovídající blokům Real-time windows target

Odpovídající funkce	Bloky Simulinku	Bloky mikrokontroléru
Filttrace	Transfer Fcn	Discrete transfer fcn
Integrace	Integrator	Discrete-Time integrator
Derivace	Derivative	Discrete derivative

Tabulka 8.2.2 Diskrétní bloky odpovídající continuous blokům

Výraznější upravu zasluhovalo pouze najetí na referenci, které obsahuje regulaci rychlosti s integrační složkou, řešení pouze switchem by nebylo možné, kdyby se kyvadlo například spustilo po delší době, regulátor by měl naintegrovaný velký akční zásah a jezdec by s největší pravděpodobností vyjel z dráhy, proto byly regulátory obsahující integrační složku vloženy do enabled subsystémů, při zmáčknutí tlačítka se tak resetují.



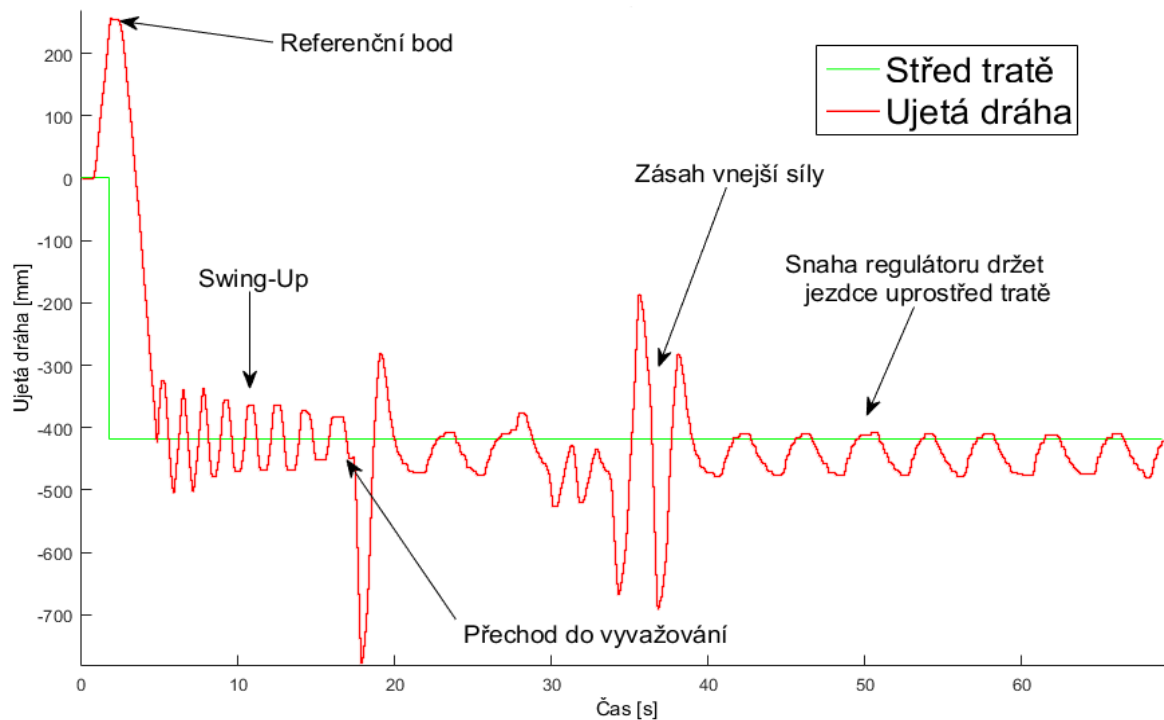
Obrázek 8.2.3 Větev najetí na referenci upravená pro automatické generování kódu

8.3 Kompilace kódu a programování mikrokontroléru

Poslední fází je kompilace kódu a naprogramování mikrokontroléru. K těmto úkonům byl použit program MPLAB X IDE. Práci s programem zahrnovalo volbu kompilátoru, který překládá C kód do strojového kódu a programátoru, v našem případě PICkit3. Pak již bylo možné řídicí algoritmus vložit do mikrokontroléru.

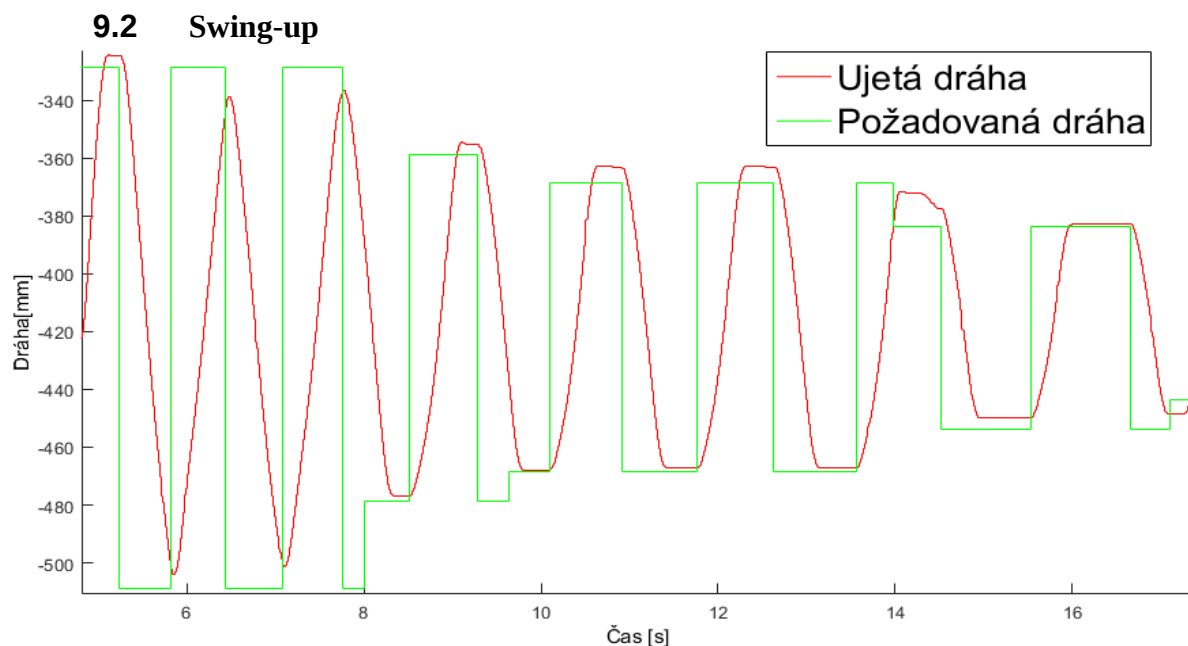
9. Prezentace výsledků

9.1 Průběh polohy jezdce na trati



Obrázek 9.1 Graf průběhu polohy jezdce na trati

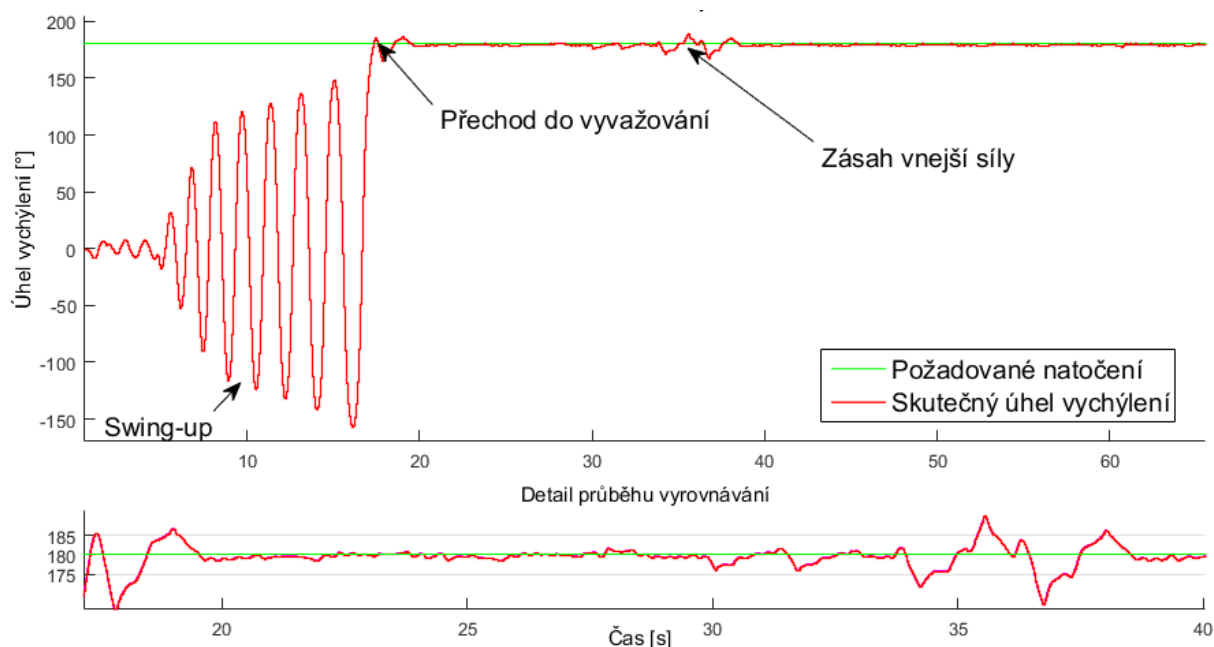
V grafu lze pozorovat pomalý příjezd jezdce na referenční bod, následný výpočet středu tratě a cestu k němu. Po dosažení středu dráhy se jezdec snaží kyvadlo vyšvihnout, to se v 18. vteřině podaří a kyvadlo je dále vyvažováno. Pro názornou ukázkou regulace byl v 35. vteřině dán kyvadlu mechanický impuls, je tedy možné pozorovat větší výchylku z důvodu velkého zásahu regulátoru.



Obrázek 9.2 Swing-up požadovaná poloha a ujetá dráha

Graf ukazuje průběh swing-up a jeho optimalizaci. V závislosti na dosaženém úhlu kyvadla se snižuje amplituda požadované vzdálenosti a tím se mění i energie dodaná kyvadlu.

9.3 Průběh vychýlení kyvadla



Obrázek 9.3 Průběh vychýlení kyvadla

Z grafu lze pozorovat postupný přechod do horní nerovnovážné polohy. Zároveň je vidět jak kyvadlo v 35. vteřině reaguje na zásah vnější síly v podobě „šťouchnutí“.

10. Závěr

Cílem této práce byla konstrukční úprava inverzního kyvadla a jeho řízení pomocí mikrokontroléru.

První část se věnuje analýze konstrukčních nedostatků, volbou a realizaci jejich nápravy. Největším zásahem do konstrukce byla kompletní změna pohonné soustavy a to přesun motoru na jezdce, pohyb pak zajišťuje ozubené soukolí. Maximální potřebný moment vypočítaný ze změřeného proudu byl o 12% větší, než moment, který vyšel M. Bradáči v simulacích. Nutno však podotknout že se jednalo o největší moment z 10 měření, jde tedy o maximální dosaženou odchylku. Další klíčovou úpravou bylo vytvoření referenčního bodu pomocí indukčních koncových spínačů, to se dá brát, jako nejdůležitější krok k autonomnosti soustavy. Úprava, kterou se nepodařilo z důvodu časové tísně dokončit byla plnohodnotná úprava kabeláže. Výsledný stav ukázal, že k pohybu je dostatečný i motor s třetinovým výkonem oproti původnímu a to i přes dvojnásobnou váhu jezdce.

Další kapitola je věnována řízení inverzního kyvadla pomocí karty MF624, nejprve popisuje vytvoření řídicího algoritmu s PID regulátory v Matlab/Simulink, následně pak vysvětluje funkce jednotlivých větví programu.

Poslední praktickou částí této práce je řízení inverzního kyvadla pomocí mikrokontroléru. Kapitola se snaží o přehlednost a názorné vysvětlení kroků k tomu nutných. Obsahuje tabulku zapojení jednotlivých kabelů, dále pak popisuje úpravu Simulinkovského modelu pro automatické generování kódu. Závěrečné ladění programu bylo složitější, avšak práci velmi usnadnil UART, který tvořil jedinou zpětnou vazbu. Jinak nebylo možno zjistit, co se v mikrokontroléru odehrává.

Rozdíl v řízení z PC kartou MF624 a řízením pomocí mikrokontroléru, znatelný není, mikrokontrolér je však vhodnější z hlediska nákladů a kompaktnosti.

Vytyčené cíle byly téměř kompletně splněny, inverzní kyvadlo však ještě není vhodné vystavit, neboť se v průběhu práce objevily nové nápady, které by zvýšily atraktivitu exponátu, ty však svojí komplikovaností a časovou náročností překračovaly rámec možností.

Mezi ně patří například vytvoření rozhraní, díky kterému by inverzní kyvadlo bylo interaktivní, obdivovatelé by pak mohli například polohovat jezdce pohybem ruky, nebo se k němu pomocí bluetooth připojit a vytvořit trasu, dalšími, již ne tak složitými úpravami by mohlo být vytvoření dvojitého kyvadla, nebo feedforward řízení.

11.Literatura a použité zdroje

- [1] BRADÁČ, M.: *Konstrukce a výroba výukového modelu „inverzní kyvadlo“*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 32 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing.Robert Grepl, Ph.D. Dostupné také z :
https://www.vutbr.cz/studium/zaverecne-prace?zp_id=19769
- [2] SUKOVATÝ, A.: *Návrh a realizace demonstračního modelu "Inverzní kyvadlo" přizpůsobeného pro dlouhodobý autonomní provoz*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 37 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing.Robert Grepl, Ph.D. Dostupné také z : https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=104415
- [3] OŽANA, Š.: *Navrhování a realizace regulátorů: učební text*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2012. ISBN 978-80-248-2605-9. Dostupné také z :
<http://www.person.vsb.cz/archivcd/FEI/NRR/Navrhovani%20a%20realizace%20regulatoru.pdf>
- [4] LAM,J.: *Control of an Inverted Pendulum*. Dostupné z:
http://control.ee.ethz.ch/~ifaatic/2014/student_projects/Johnny_Lam_report_238.pdf
- [5] Pojem mikrokontrolér:, Dostupné z: <http://it-slovník.cz/pojem/mikrokontroler> 2016-05
- [6] SCHLEGEL,M.:*Průmyslové pid regulátory:teorie pro praxi*. Plzeň: Fakulta aplikovaných věd ZČU v Plzni, katedra kybernetiky, 2001, 24 s. Dostupné také z :
<http://zcu.arcao.com/kky/zky/Prago1.pdf>
- [7] Datový list dsPIC :, Dostupné z :
<http://www.microchip.com/wwwproducts/en/dsPIC33FJ64MC804>
- [8] Datový list motoru Maxon :, Dostupné z :
http://www.maxonmotor.com/medias/sys_master/root/8816798859294/15-140-EN.pdf
- [9] Datový list Encodéru IRC 305-6000 :, Dostupné z :
http://www.larm.cz/templates/larm/data/82_irc300-325gb.pdf
- [10] Datový list Encodéru HEDL-5540-I13 :, Dostupné z :
<http://www.avagotech.com/docs/AV02-1046EN>
- [11] Datový list karty MF624 :, Dostupné z : <http://www.humusoft.cz/datacq/mf624/>
- [12] SHIGLEY,J.E.,MISCHKE,Ch.R.,BUDYNAS,R.G.: *Konstruování strojních součástí*. Překlad 7. Vydání (McGraw Hill 2004), 2008,1300 s.
- [13] Datový list motoru PD 4266-24-4 :, Dostupné z :
<http://www.transmotec.cz/dc-motory-prevodovka-planetova/serie-pd4266.html>
- [14] Datový list koncových spínačů Dostupné z :
http://emas.clickeshop.sk/images_upd/storage/019-Extended_sensing_distance-DC3_LR08-1-10-30VDC.pdf
- [15] Datový list edukit :, Dostupné z :
http://plesaty.welbloud.cz/_media/hw/picedukit_datasheet_r111105.pdf

12. Seznam obrázků, grafů a tabulek

Obrázek 1.1 Vozítko Segway.....	8
Zdroj: http://www.segwayrotterdam.nl/wp-content/uploads/2014/03/133942.jpg	
Obrázek 1.2 Přistání rakety Falcon 9.....	8
Zdroj: https://www.flickr.com/photos/spacex/25787998624/	
Obrázek 3.1 Řízení pomocí regulátoru.....	10
Zdroj: http://www.person.vsb.cz/archivcd/FEI/NRR/Navrhovani%20a%20realizace%20regulatoru.pdf	
Obrázek 3.2 PID regulátor.....	10
Zdroj: http://arduino.bymyself.blogspot.cz/2013/03/linusbot-line-follower-robot-controle.html	
Obrázek 3.4.1 PIC Edu Kit.....	12
Zdroj: http://plesaty.welbloud.cz/_media/hw/picedukit_datasheet_r111105.pdf	
Obrázek 4.1 Rám inverzního kyvadla.....	13
Zdroj: https://www.vutbr.cz/studium/zaverecne-prace?zp_id=19769	
Tabulka 4.2.1 Parametry RE35_118777.....	13
Obrázek 4.2.2 Klec s motorem a převodovkou.....	14
Tabulka 4.3.1 Parametry enkodérů.....	14
Obrázek 4.3.2 Encodér IRC 305-6000.....	14
Zdroj: http://www.larm.cz/templates/larm/data/82_irc300-325gb.pdf	
Obrázek 4.3.3 Encodér HEDL-5540-I13.....	14
Zdroj: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=104415	
Obrázek 4.4.1 Karta MF624.....	15
Zdroj: http://www.humusoft.cz/data/img/datacq/mf624.jpg	
Obrázek 4.4.2 ISL Power Board R2.0.....	15
Obrázek 5.1 Pohonná soustava.....	16
Zdroj: Sukovatý A.: prezentace bakalářské práce	
Obrázek 5.2 Deska plošných spojů propojující kabely.....	16
Obrázek 6.1 Graf průběhu odebíraného proudu.....	18
Tabulka 6.1.2 Vlastnosti pohonné soustavy motoru PD 4266-24-4.	19
Obrázek 6.1.3 Stejnoseměrný motor PD 4266-24-4 s převodovkou a enkodérem.....	20
Zdroj: http://www.transmotec.cz/dc-motory-prevodovka-planetova/ostatni-serie-pd4266.html	
Obrázek 6.1.4 Charakteristika motoru PD 4266-24-4.....	20
Zdroj: http://www.transmotec.cz/dc-motory-prevodovka-planetova/serie-pd4266.html	
Tabulka 6.3. Tabulka zapojení.....	22
Tabulka 6.5.1 Parametry koncového spínače.....	23
Obrázek 6.5.2 Koncový spínač.....	23
Zdroj: http://www.tme.eu/de/katalog/induktive-sensoren-zyindrisch_112561/?id_producer=773	
Obrázek 6.5.3 Uložení koncového spínače.....	23
Obrázek 6.6.1 Původní Hallův senzor.....	24
Obrázek 6.6.2 Nový Hallův senzor: TLE4945L.....	24
Obrázek 6.6.3 Model inverzního kyvadla v původním stavu.....	25
Zdroj: Bradáč M.: Manuál inverzního kyvadla	
Obrázek 6.6.4 Model inverzního kyvadla po úpravě	25
Obrázek 6.6.5 Model inverzního kyvadla po úpravě, detail jezdce.....	25
Obrázek 7.1 Algoritmus reference.....	26
Obrázek 7.2 Algoritmus swing-up.....	27
Obrázek 7.3 Algoritmus vyvažování v nestabilní poloze.....	28
Obrázek 7.4.1 Periferie a bezpečnost proti vyjetí z dráhy.....	28

Obrázek 7.4.2 Algoritmus řízení modelu inverzního kyvadla.....	29
Tabulka 8.1 Zapojení kabelů do eduKitu.....	30
Tabulka 8.2.1 Bloky mikrokontroléru odpovídající blokům Real-time windows target.....	31
Tabulka 8.2.2 Diskrétní bloky odpovídající continues blokům.....	31
Obrázek 8.2.3 Větev najetí na referenci upravená pro automatické generování kódu.....	31
Obrázek 9.1 Graf průběhu polohy jezdce na trati	32
Obrázek 9.2 Swing-up požadovaná poloha a ujetá dráha	32
Obrázek 9.3 Průběh vychýlení kyvadla	33

13. Seznam použitých symbolů

$M_{\max}$	[Nm]	...maximální moment
M_{nom}	[Nm]	...nominální moment
$I_{\max}$	[A]	...maximální proud
I_{nom}	[A]	...nominální proud
K_r	[Nm/A]	...momentová konstanta motoru
i	[-]	...převodový poměr
$M_{\max M}$	[Nm]	...maximální moment motoru
Eff	[%]	...účinnost
$y_{\max}$	[m]	...maximální průhyb
l	[m]	...délky hřebene
q	[N/m]	...liniové zatížení
E	[GPa]	...průřezový modul
J	[mm ⁴]	...kvadratický moment průřezu
h	[mm]	...výška průřezu hřebene
b	[mm]	...šířka průřezu hřebene
m	[kg]	...průřezový modul
g	[m/s ²]	...gravitační zrychlení

14.Seznam příloh

Přiložené CD obsahuje následující soubory:

1. Kyvadlo_MF624 – Simulinkovský model pro řízení inverzního kyvadla pomocí karty MF624.
2. Kyvadlo_mikrokontroler - Simulinkovský model připravený pro automatické generování kódu.