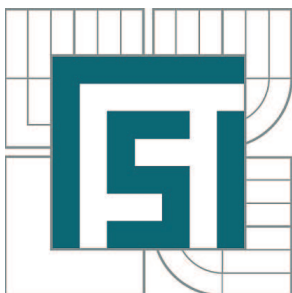


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A
BIOMECHANIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND
BIOMECHANICS

NÁVRH A REALIZACE VÝUKOVÉHO MODELU KULIČKA NA TYČI

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF EDUCATIONAL MODEL BALL AND BEAM

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

JAKUB KRIŽAN

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ROBERT GREPL, Ph.D.

BRNO 2010

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky

Akademický rok: 2009/10

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Křižan Jakub

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Mechatronika (3906R001)**

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:

Návrh a realizace výukového modelu Kulička na tyči

v anglickém jazyce:

Design and implementation of educational model Ball and beam

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se bude zabývat návrhem, výrobou a testováním laboratorního výukového modelu "Kulička na tyči".

Cíle bakalářské práce:

- 1) Proved'te základní rešerši ohledně výukových modelů typu "Kulička na tyči". Popište stručně jejich vlastnosti (parametry, sensorika, cena).
- 2) Proved'te rozbor možných variant řešení včetně jednotlivých mechanických komponent a sensoriky a uveďte jejich výhody a nevýhody (technické, ekonomické).
- 3) Po dohodě s vedoucím BP zajistěte výrobu fyzického modelu.
- 4) Realizujte potřebnou výkonovou elektroniku a připojte fyzický model ke kartě MF624.
- 5) Proved'te základní estimaci parametrů soustavy.
- 6) Realizujte lineární řízení pohybu.

Seznam odborné literatury:

- <http://support.dce.felk.cvut.cz/lab26/index.php?page=main>
- <http://www.tequipment.com/>
- Valášek, M.: Mechatronika, Vydavatelství ČVUT 1995

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Robert Grepl, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2009/10.

V Brně, dne 15.11.2009



prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
Ředitel ústavu

doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ANOTACE

Práce se zabývá problematikou stavby, řízení a identifikace výukového modelu „kulička na tyči“.

První část práce zmiňuje možnosti mechanické realizace s ohledem na již existující modely a zkoumá možnosti realizace pohonu a sensoriky. Druhá část je zaměřena na bližší popis elektroniky s ohledem na připojení ke kartě MF624. V dalších částech je blíže popsáno použité řízení a odhad parametrů modelu.

ANNOTATION

This thesis is focused on problem of construction, control and identification of educational model „ball on beam“.

First part mentions options of mechanical realisation with regard to already existing models and investigates possibilities of realization of drive and sensors. Second part is focused on electronics with regard to connection to data acquisition board MF624. Last parts describe the control and estimation of model parameters.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych tímto poděkoval vedoucímu své práce Ing. Robertu Greplovi Ph.D za cenné rady při tvorbě bakalářské práce. Mé díky patří také mým rodičům za podporu v dosavadním studiu. V neposlední řadě bych rád poděkoval všem, kteří mi pomohli nabýt nové zkušenosti, zejména pak kolegům z mechatronické laboratoře, kteří mě vždy navedli správným směrem a neváhali obětovat svůj už tak dost drahocenný čas.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci vypracoval samostatně a uvedl všechny použité zdroje a literaturu.

V Brně dne: 26. 5. 2010

Jakub Križan

OBSAH

1.	Úvod	12
2.	Mechanická realizace	13
2.1.	Existující řešení	13
2.1.1.	Tyč spojená přímo s rotorem	13
2.1.2.	Tyč spojená s motorem přídatným mechanismem	13
2.2.	Volba vlastní realizace	14
2.2.1.	Volba motoru	14
2.2.2.	Volba sensoriky	15
2.2.2.1.	Senzor natočení	15
2.2.2.2.	Senzor polohy kuličky	16
2.2.3.	Volba konstrukce	17
3.	Elektronika	19
3.1.	Power module LMD 18200	19
3.2.	Využití volitelných propojení	19
3.3.	Senzorika	20
3.3.1.	Potenciometr	20
3.3.2.	IR senzory vzdálenosti	20
3.3.3.	Pojistka proti přetočení	22
3.4.	Kabeláž	23
4.	Řízení	24
4.1.	Filtrace signálů a kalibrace čidel	24
4.1.1.	Potenciometr	24
4.1.2.	Senzor proudu	25
4.1.3.	IR senzory vzdálenosti	25
4.2.	PID regulátor	26
4.2.1.	PID regulátor natočení	26
4.2.2.	Nadřazený polohový regulátor	28
5.	Odhad parametrů modelu	30
5.1.	Parametry určené přímým měřením	30
5.2.	Parametry určené odhadem	31
5.2.1.	Odhad parametrů motoru včetně tyče	31
5.2.2.	Odhad parametrů styku kulička-tyč	34
6.	Závěr	36
7.	Použitá literatura a další zdroje	37

1. ÚVOD

Výukový model „kulička na tyči“ je, podobně jako inverzní kyvadlo, typickým příkladem přirozeně nestabilního systému. V běžném životě se setkáváme s velkou spoustou takových systémů. Příkladem takového systému může být například jízdní kolo. Koneckonců i samotná chůze, i když si to mnohdy neuvědomujeme, je velmi nestabilní proces. Všechny tyto a mnohé další příklady mají jednu společnou vlastnost, pro udržení určité (nestabilní) polohy je zapotřebí zpětná vazba a adekvátní řízení. Pokud tato vazba či řízení z nějakého důvodu nefunguje, systém zpravidla zaujme stabilní polohu. (Cyklista leží i s kolem na zemi.) Některé systémy jako kolo jsou dosti pomalé na to, abychom je řídili sami. Některé ovšem požadují velikou rychlost a řízení je pro nás téměř nemožné. Například udržet pohybem ruky inverzní kyvadlo ve vzpřímené poloze může být příliš tvrdý oříšek. Proto vzniká velká potřeba vyvíjet regulátory, které tuto činnost budou konat za nás rychleji, lépe, bez námahy a hlavně spolehlivě.



Obr. 1 - lidský regulátor v akci (převzato z [1])

Protože na moderní techniku, jako například letadla, ale i na prostředky spíše pro zábavu, jakým může být například segway, jsou kladeny čím dále vyšší nároky, často nezbyvá, než systém navrhnout jako nestabilní. Takovéto systémy drží v požadované poloze jen jistý zásah řízený regulátorem. Je tedy zřejmé, že existují aplikace, kde může mít selhání regulátoru fatální následky. Při pádu ze segwaye vyvázne člověk nejspíše jen s několika oděrkami, to o pádu letadla jistě říci nelze. Výukové modely typu „kulička na tyči“ přibližují vlastnosti nestabilních systémů studentům. Prostřednictvím těchto modelů se studenti mohou naučit takovéto systémy řídit a „bezpečným“ způsobem se poučit ze svých chyb, které si v budoucí praxi nebudou moci dovolit.

2. MECHANICKÁ REALIZACE

Při návrhu konstrukce výukového modelu byl brán zřetel na několik faktorů ovlivňujících následnou funkčnost, náročnost výroby modelu a s tím spojenou cenu. Určitou inspirací se staly již existující výukové modely.

2.1. Existující řešení

Protože model kuličky na tyči je typickým modelem nestabilního systému a často používanou výukovou pomůckou, na internetu lze nalézt velkou spoustu jeho realizací, ať už ve formě profesionálních výukových modelů, tak zejména ve formě bakalářských či diplomových prací studentů na celém světě. Po mechanické stránce byla zajímavá zejména následující řešení.

2.1.1. Tyč spojená přímo s rotorem

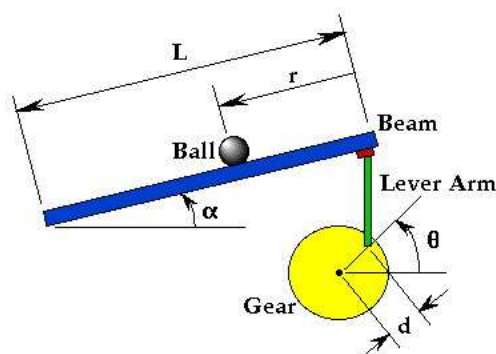
Toto řešení je zřejmě nejčastější, je jednoduché na konstrukci i implementaci řízení. Využívá ho například profesionální výukový model od firmy TecQuipment [2], model studentů David Evanko a Arend Dorsett z University of North Florida poháněný servomotorem (více v [3]) a další řada modelů.



Obr. 2 - Profesionální řešení (převzato z [2])

2.1.2. Tyč spojená s motorem přidavným mechanismem

U tohoto řešení je tyč připojena přes mechanismus, který s ní otáčí jen v daném rozsahu. Viz např. obrázek 3.



Obr. 3 - Připojení přes mechanismus (převzato z [4])

Tyč tedy nelze natačít o libovolný úhel. Výhodou mohou být nižší nároky na moment motoru. Tohoto řešení využili studenti Petr Vojčínák, Martin Pieš a Radovan Hájovský z Vysoké školy báňské – Technické univerzity v Ostravě, tito použili jako akční člen rovněž servomotor, vstupní veličinou jejich systému byl tedy úhel natočení tyče (více v [5]).

2.2. Volba vlastní realizace

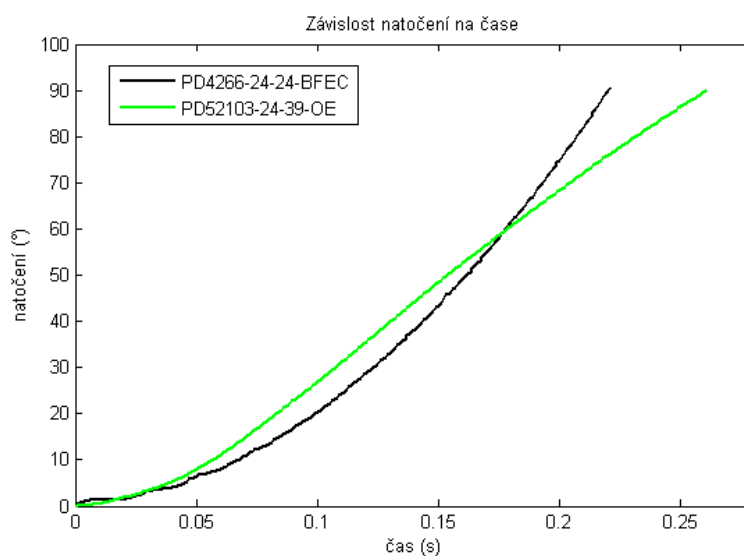
2.2.1. Volba motoru

Srdcem celého modelu je samozřejmě akční člen, vedoucím práce mi byly původně nabídnuty stejnosměrné motory značky Transmotec, konkrétně modely PD4266-24-24-BFEC s magnetickým enkodérem s 38 magnetickými póly [6] a PD52103-24-39-OE s optickým enkodérem s 1000 pulzy za otáčku [7]. Další důležité parametry obou motorů pro napájecí napětí 24V jsou uvedeny v tabulce 1.

Motor	Převodový poměr[-]	Jmenovitý moment [Nm]	Jmenovitý výkon [W]	Jmenovité otáčky [ot./min]	Hmotnost [kg]
PD4266-24-24-BFEC	1:24	0,932	34,7	240	0,551
PD52103-24-39-OE	1:39	3,767	52,8	79	2

Tabulka 1 – Důležité parametry motorů

Tyto parametry měly sloužit k výběru motoru, protože se ovšem jedná o parametry v ustáleném stavu pro kontinuální otáčení a nás zajímá provoz start-stop, bylo nutné určit reakci motorů na skokovou změnu napětí a posoudit rychlost reakce. Zprvu byl vytvořen jednoduchý model pro výpočet rozběhu motoru s tyčí délky 1m připojenou v těžišti. Kritériem měla být doba přeběhu z vodorovné polohy do polohy svislé, tedy otočení o 90°. Záhy se ukázalo, že tato cesta nikam nevede, protože významnou roli hrají momenty setrvačnosti rotorů, které výrobce neuvádí, proto bylo přistoupeno k experimentálnímu posouzení vhodnosti motorů a to s použitím speciálně pro tento účel zhotovených přípravků. Motory byly testovány skokem napájecího napětí na hodnotu 24V. Výsledkem byla charakteristika zobrazená na obrázku 4.



Obr. 4 - naměřená reakce motorů na skok napětí o velikosti 24V.

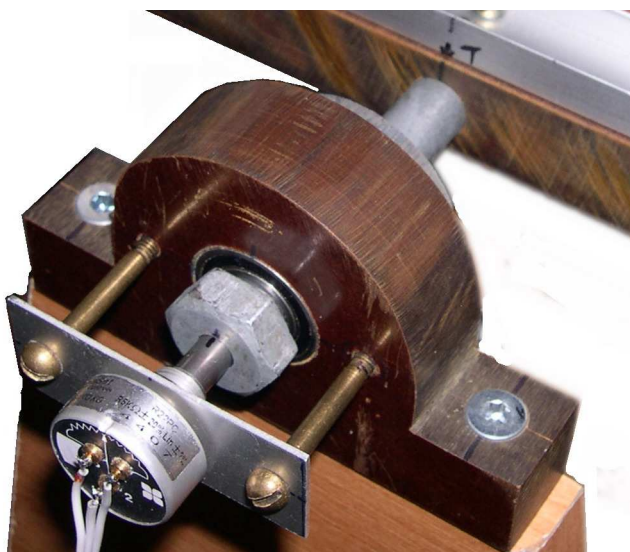
Z této je patrné, že motor PD4266-24-24-BFEC dosáhne natočení o 90° dříve, ovšem jeho rozběh trvá podstatně delší dobu, než je tomu u PD52103-24-39-OE. Proto se motor PD52103-24-39-OE jevil jako vhodnější. Dalším důvodem k použití tohoto motoru byla robustnost jeho konstrukce (velký průměr převodovky, výstupní hřídel o průměru 12mm), která umožňuje startstopový provoz po dlouhou dobu bez znatelného opotřebení. Naproti tomu motor PD4266-24-24-BFEC vydával při skokové změně napětí dosti nepříjemné zvuky, napovídající o jeho slabší konstrukci. Další otázkou bylo využití enkodéru pro zjištění polohy tyče, 1000 pulzový enkodér na motoru PD52103-24-39-OE by teoreticky dokázal určit polohu tyče s rozlišením přibližně $0^\circ 1'$. Tato představa se ovšem záhy ukázala jako mylná, protože 2 stupňová převodovka si vybrala svou daň ve formě vůle, která na výstupu činila přibližně $0,5^\circ$. Proto bylo rozhodnuto o použití jiného senzoru natočení v podobě potenciometru - více v kapitole 2.2.2.1. Protože by byla škoda nevyužít drahého enkodéru připevněného na motoru PD52103-24-39-OE, byl vedoucím práce navrhnout motor PD52103-24-39-B, jenž má naprosto shodné vlastnosti, ale namísto enkodéru je vybaven brzdou. Tato by nebyla upotřebena, a tak byla z motoru demontována.

2.2.2. Volba senzoriky

Pro řízení modelu je nezbytně nutná znalost základních stavů systému. V případě modelu kulička na tyči jsou základními stavy poloha kuličky a natočení tyče. Oba tyto stavy lze měřit řadou způsobů, úkolem bylo nalézt optimum jak z hlediska přesnosti, tak z hlediska ceny.

2.2.2.1. Senzor natočení

Bylo zváženo několik způsobů snímání natočení tyče, jako první z nich byl uvažován enkodér na motoru. Jeho výhodou je výstup v podobě pulzů, který není moc náchylný na šum. Nevýhodou je ovšem znalost pouze relativní polohy, a jak se ukázalo, tak vlivem vůlí v převodovce i malá přesnost. Další možností by bylo umístění enkodéru přímo na hřídel s tyčí, tím by se eliminovaly problémy s vůlí, ovšem z důvodu požadavku relativně přesné regulace natočení by byl potřeba enkodér s velkým počtem pulzů na otáčku (min. 1000ppr). Cena takového enkodéru se pohybuje v řádu několika tisíc korun. Jako další a v konečné fázi vítězné řešení, bylo použití precizního jednotáčkového potenciometru. Jeho nevýhodou je výstup v podobě analogového signálu, který snadno podléhá rušení. Výhodami jsou však znalost absolutní polohy a v neposlední řadě nízká cena. Kvůli jednoduchosti řešení bylo uvažováno s napájením potenciometru přímo z řídicí karty MF624 napětím 5V. Protože řídicí karta má nízkou proudovou zatížitelnost (asi 100mA), bylo potřeba zvolit vhodnou hodnotu odporu potenciometru. Příliš nízká hodnota odporu by nadměrně zatěžovala kartu. Signál z potenciometru o vysoké hodnotě odporu by byl nestabilní a podléhal by více rušení. Nakonec byl za rozumnou hodnotu pracovního proudu zvolen proud 1mA, což při napájení 5V určilo celkový odpor potenciometru na $5k\Omega$. Na českém trhu není mnoho distributorů precizních jednotáčkových potenciometrů. Na doporučení vedoucího práce byl nakonec kontaktován obchodní zástupce společnosti Megatron s.r.o. pro Českou republiku, který nabídl k dodání potenciometr od výrobce RotaSet Controls, konkrétně typ R22PC- $5k\Omega$ (více v [8]) v ceně 187,-Kč bez DPH. Po domluvě s vedoucím práce byl tento potenciometr zakoupen.



Obr. 5 – Potenciometr na modelu

2.2.2.2.Senzor polohy kuličky

Snímání polohy kuličky lze opět realizovat několika způsoby. Prvním z nich je použití kovové kuličky a umístění odporové dráhy na tyč, nevýhodou tohoto způsobu je možná změna odporu způsobená nečistotami a také omezení se na kovovou kuličku. Tohoto způsobu snímání polohy je využito ve většině případů obdobného modelu. Dalším způsobem je využití ultrazvukového senzoru vzdálenosti umístěného na konci tyče, tento způsob je ovšem dosti nákladný. Cena vhodného senzoru se pohybuje v řádu několika tisíc korun. Podobně jsou na tom laserové senzory vzdálenosti, tyto poskytují velikou přesnost, jejich cena ovšem činí desítky tisíc korun. Další možností by mohlo být například využití kamery a analýzy obrazu pro určení polohy. Toto řešení by ale bylo zřejmě složité a přesahovalo by rámec bakalářské práce. Jako vhodné řešení bylo nakonec vybráno použití infra-červeného senzoru vzdálenosti, konkrétně výrobku společnosti SHARP s typovým označením GP2Y0A21YK0F (více v [9]).

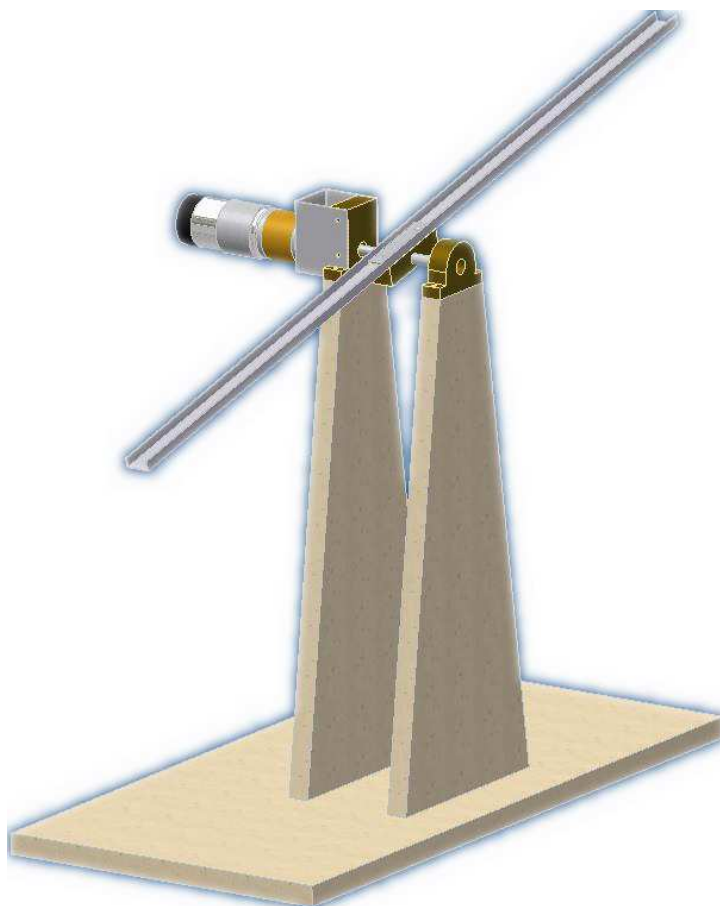


Obr. 6 - Infra-červený senzor vzdálenosti (převzato z [9])

Výstupem tohoto senzoru je napětí v nelineární závislosti na vzdálenosti. Výrobce uvádí měřicí rozsah senzoru 10-80cm, zkušenosti s tímto senzorem a následně i testy na multimetru však ukázaly, že použitelný rozsah je menší a to zhruba 10-55cm. Dále od senzoru se hodnota výstupního napětí mění jen velice pozvolna a její výchylka je srovnatelná s šumem. Proto bylo rozhodnuto o použití dvou senzorů umístěných proti sobě podobně jako v [3].

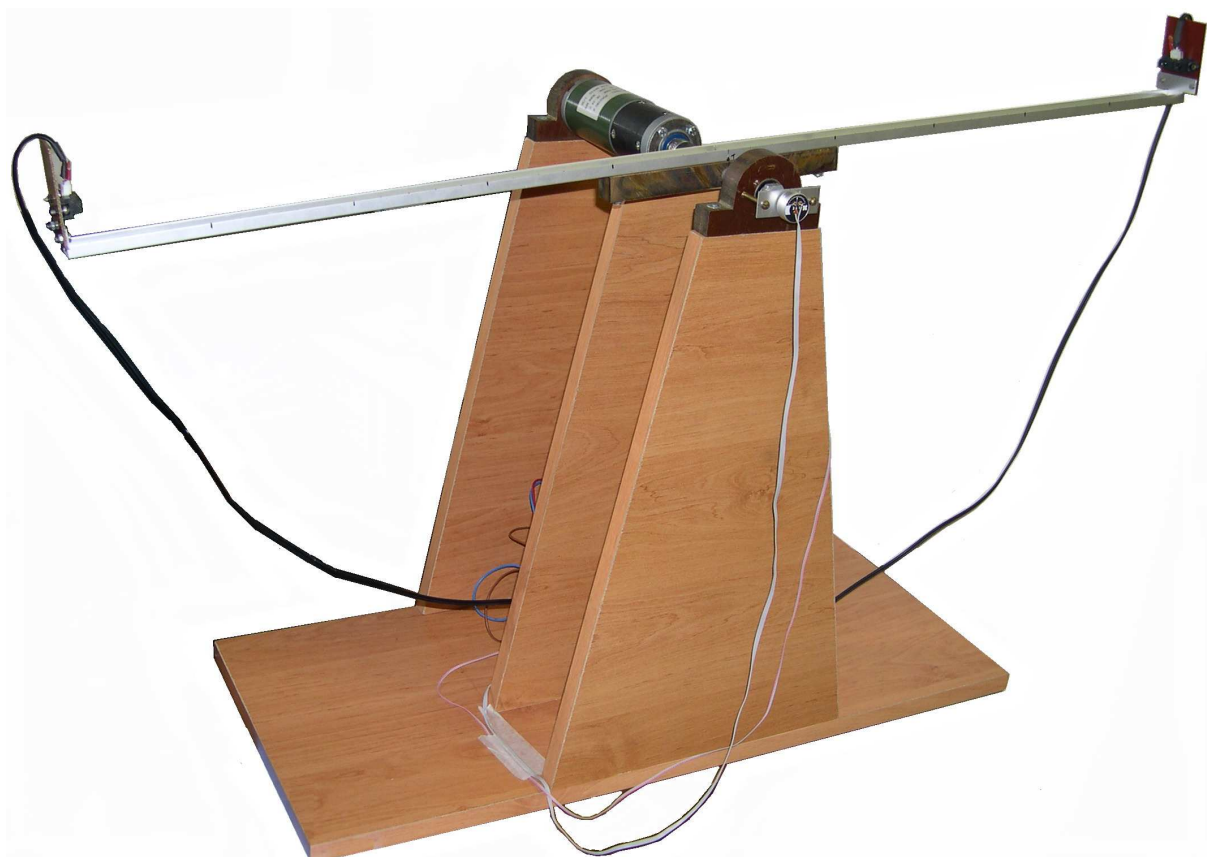
2.2.3. Volba konstrukce

Konstrukce vycházela především z požadavku jednoduchosti. Vybraný motor disponuje dostatečným momentem, a proto se nejjednodušším řešením jevílo připojení tyče přímo na osu motoru. Tato myšlenka byla použita i při prvotním návrhu konstrukce, který byl zpracován v 3D editoru Autodesk Inventor. Vyobrazení tohoto návrhu je na obrázku 7.



Obr. 7 - Prvotní návrh konstrukce

Výsledná konstrukce se od návrhu liší jen v detailech, což je patrné z obr. 8. Dalším důležitým hlediskem tvorby modelu byla volba materiálů. Pro tyč byl zvolen hliníkový profil tvaru „U” používaný běžně k lištování dřevotřískových desek. Tento profil je vhodný zejména kvůli své nízké hmotnosti a dostatečné ohybové tuhosti. Pro výrobu uložení motoru a ložiska na protilehlé straně osy byla použita pertinaxová deska tloušťky 20mm. Pertinax je materiál na bázi papíru a formaldehydové pryskyřice používaný hlavně v elektrotechnice. Jeho výhodami jsou dostatečná pevnost a snadná obrobitelnost. Pro výrobu podpor a podstavců byly využity desky z laminované dřevotřísky.



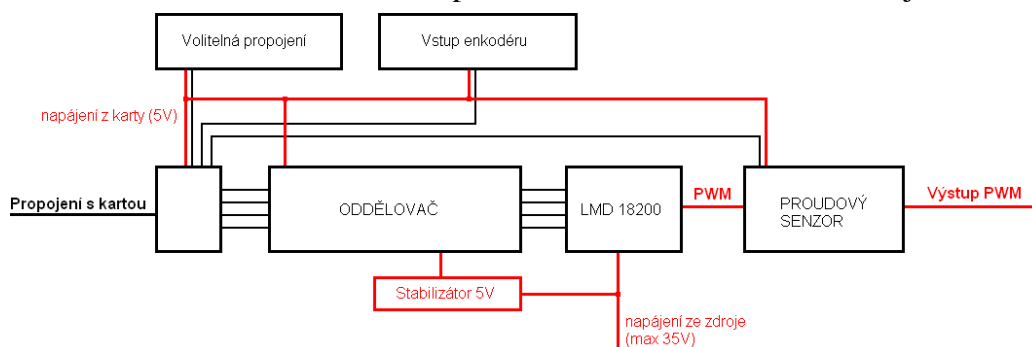
Obr. 8 - Realizovaný model

3. ELEKTRONIKA

V případě modelů řízených pomocí měřicích karet nebývá použita elektronika nikterak složitá. V podstatě jde hlavně o oddělení signálových obvodů řízených kartou a výkonové elektroniky použité pro pohon motorů, popřípadě jiných výkonových členů. V případě senzorů s nízkým příkonem lze nutnost oddělení nahradit napájením přímo z měřicí karty.

3.1. Power module LMD 18200

Pro řízení modelu kulička na tyči byl použit univerzální napájecí modul vyvinutý pro potřeby mechatrické laboratoře. Tento modul umožňuje řízení jednoho motoru pomocí signálu PWM a to v obou směrech, směr je udáván hodnotou logického signálu DIR. Nechybí ani elektronická brzda řízená logickým signálem BRAKE. Na modulu je dále osazen proudový senzor měřící proud na výkonovém výstupu. Součástí modulu může být i propojení na enkodér, které není v případě modelu kulička na tyči osazeno. Všestrannost modulu doplňuje 6 volitelných propojení, které jsou vyvedeny přímo na konektor Canon 25 zajišťující komunikaci s řídicí kartou. Funkce těchto propojení je určena zapojením kabeláže ke kartě a v případě modelu kulička na tyči jsou využity jako analogové vstupy. Napájení jednotky je dvojitý, jednu část tvoří napájení z měřicí karty napětím 5V a druhou napájení ze zdroje pro výkonovou elektroniku o maximálním napětí 35V. Blokové schéma modulu je na obrázku 9.



Obr. 9 - Blokové schéma napájecího modulu

Jádrum modulu je obvod LMD 18200 [10] zastupující klasický H-bridge (více např. v [11]), tento je schopen přenést špičkový proud až 6A kontinuálně pak 3A. Oddělení od karty zajišťuje 4-kanálový izolátor ISO7241 se 3 vstupy pro TTL signály PWM, DIR a BRAKE a jedním výstupem pro TTL signál TEMP, přenášející informaci o přehřátí obvodu LMD18200. Měření proudu zajišťuje proudový senzor LEM_LTS_6NP [12] zařazený na výstupu modulu. Signálová část senzoru je elektricky oddělena, takže je možné ji připojit přímo k řídicí kartě.

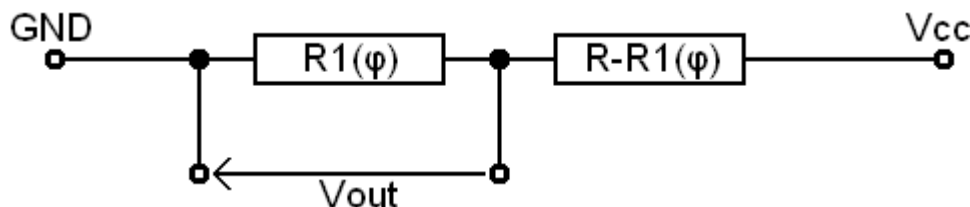
3.2. Využití volitelných propojení

Jak již bylo zmíněno, napájecí modul disponuje šesti volitelnými propojeními ke kartě. U modelu kulička na tyči jsou využita 3 z nich, jedno slouží jako analogový vstup pro výstup z potenciometru a další 2 jako analogový vstup pro signály od infračervených polohových senzorů.

3.3. Senzorika

3.3.1. Potenciometr

Pro měření polohy byl využit precizní potenciometr značky RotaSet typ R22PC [8] s hodnotou celkového odporu $5k\Omega$. Takováto hodnota odporu umožňuje potenciometr napájet přímo z měřicí karty napětím 5V. Výstup je spojen s analogovým vstupem karty. Jedná se o nízkošumový potenciometr s vysokou linearitou. Konstrukčně se jedná o potenciometr s plastovou odporovou dráhou. Na rozdíl od vinutého drátového potenciometru, není tedy jeho odpor kvantován a teoreticky tedy dosahuje nekonečného rozlišení. Zajímavostí je provedení PC značící absenci mechanické zarážky, potenciometr se tedy může otáčet kontinuálně a v případě protočení modelu nehrozí jeho zničení. Z hlediska zapojení je potenciometr v podstatě napěťový dělič jak ilustruje obr. 10. Pro takovýto platí vztah (1), za předpokladu lineární závislosti části odporu na natočení $R1(\varphi) = K \cdot \varphi$ pak vztah (2). Výstupní napětí je tedy přímo úměrné natočení potenciometru. Teoreticky je k části odporu, na které je měřeno napětí, vřazen paralelně vnitřní odpor řídicí karty. Výrobce však udává vnitřní odpor karty vyšší než $10^{10}\Omega$, lze jej tedy zanedbat.



Obr. 10 - potenciometr jako dělič napětí

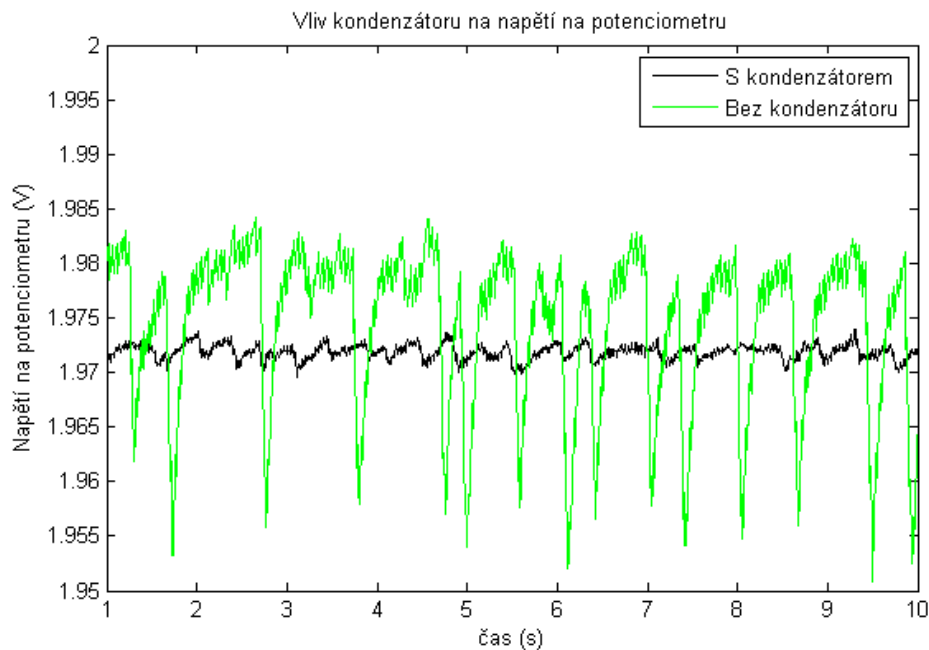
$$V_{OUT} = V_{CC} \cdot \frac{R1(\varphi)}{R} \quad (1)$$

$$V_{OUT} = V_{CC} \cdot \frac{K}{R} \cdot \varphi \quad (2)$$

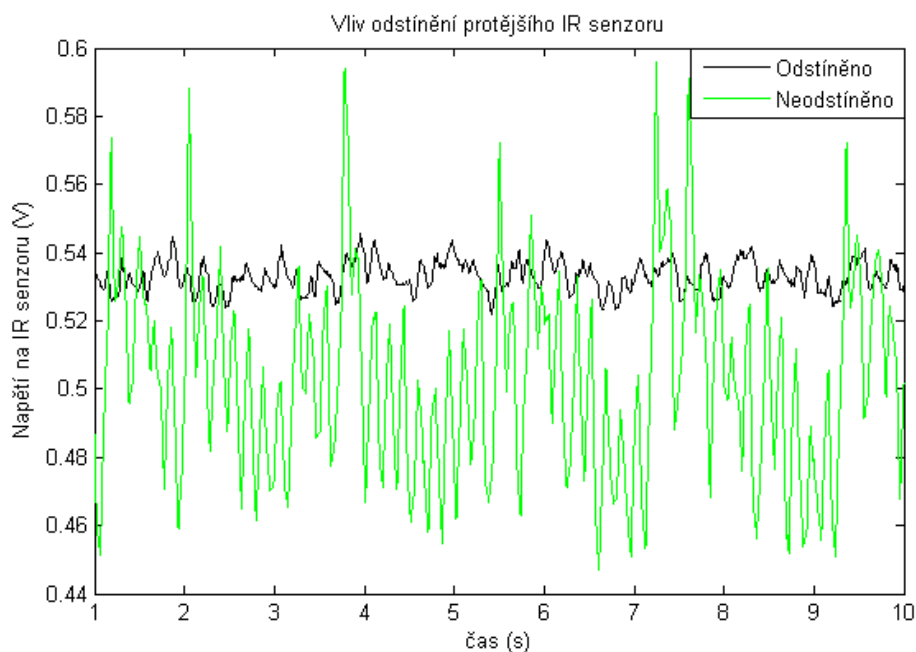
3.3.2. IR senzory vzdálenosti

Pro měření vzdálenosti kuličky byla použita dvojice senzorů SHARP typ GP2Y0A21YK0F. Napájecí napětí senzorů je 5V a proudový odběr 30mA. Tyto parametry umožňují senzory napájet přímo z měřicí karty. Výstupem senzorů je analogová hodnota napětí nelineárně závislá na vzdálenosti objektu, pro měření jsou tedy využity analogové vstupy měřicí karty. Ze zkušeností se senzory [13] vyplynulo, že měření neprobíhá kontinuálně, ale diskrétně s periodou 25Hz, což způsobuje, vzhledem k tomu, že měřicí karta je měkký zdroj, zakmitání napájecího napětí. Toto se plně potvrdilo hned při prvním měření, kdy byl pozorován výrazný šum na potenciometru patrný z obr 11. Po vzoru předchůdce byl šum odstraněn přidáním kondenzátoru o kapacitě $2200\mu F$ k napájení z karty. Dalším řešeným problémem bylo vzájemné optické rušení senzorů. Senzory jsou na modelu umístěny proti sobě ve vzdálenosti 1m, původní koncepce uvažovala s gumovou „skákačí“ kuličkou o průměru asi 25mm. Velikost kuličky se ovšem ukázala pro vzájemné odstínění senzorů nedostatečná a zejména ve střední oblasti tyče bylo pozorováno výrazné rušení patrné z obr. 12. V kombinaci se strmostí závislosti vzdálenosti na napětí pro tuto oblast (viz kap. 4.1.3), představoval šum nepřijatelnou nejistotu polohy větší než 10cm. Řešením se nakonec ukázalo být použití větší kuličky o průměru asi 60mm a posunutí IR senzorů nad tyč do výšky odpovídající středu kuličky (viz obr. 13). Tímto bylo vzájemné rušení senzorů potlačeno.

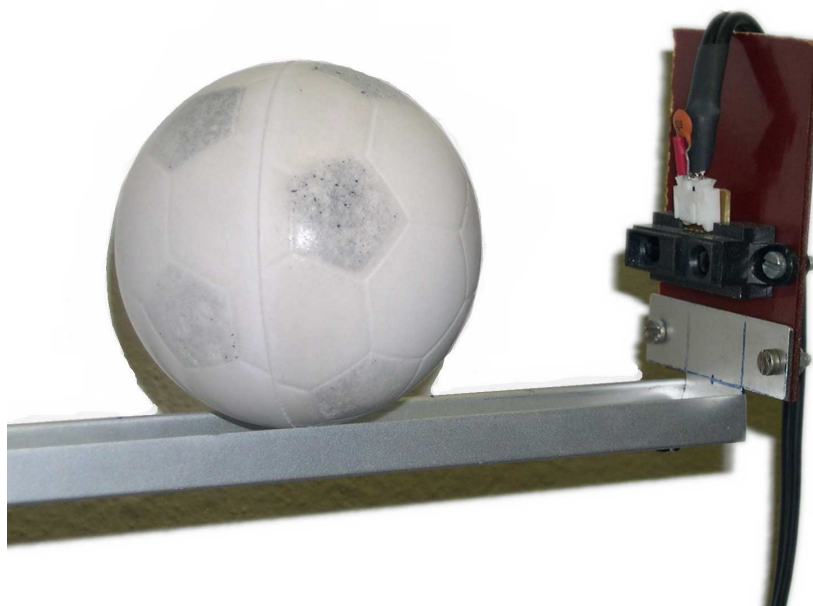
Dalšími nechtostmi senzorů se ukázala být náchylnost na sluneční záření, kdy osvětlený senzor udává napětí odpovídající menší vzdálenosti objektu a v neposlední řadě velká citlivost na natočení senzoru, kdy i malá výchylka v uchycení senzoru způsobuje výraznou změnu udávané hodnoty vzdálenosti. Tyto nechtosti nejsou na modelu dále ošetřeny.



Obr. 11 - Vliv kondenzátoru na kmitání napájecího napětí



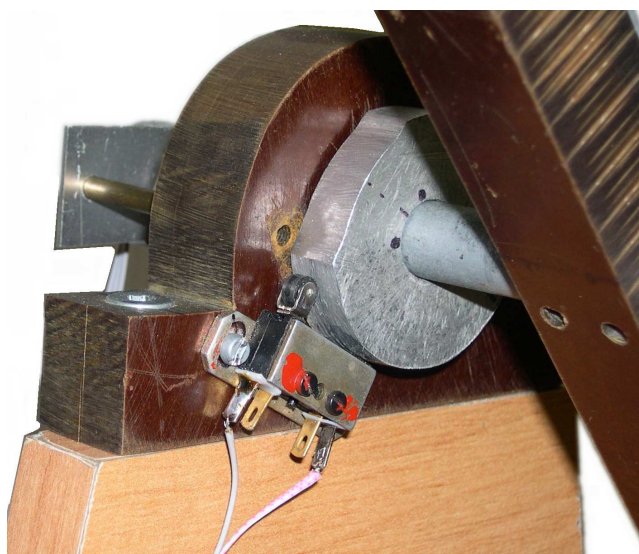
Obr. 12 - Vliv odstínění protějšího IR senzoru



Obr. 13 – kulička a vysunutý senzor

3.3.3. Pojistka proti přetočení

Za jistý druh senzoru lze považovat i pojistku proti přetočení tyče, která byla na model po radě vedoucího práce přidána. Tato má za úkol zajistit, aby nedošlo k přetočení tyče, což by mohlo způsobit zamotání kabelů od IR senzorů. Tato pojistka byla původně realizována softwarově, kdy byl pro úhel natočení větší než 30° nastaven logický signál BRAKE do úrovně 1 a tím byl model zastaven. Tato však může selhat např. v případě zaneprázdnění počítače nebo v případě požití jiných řídicích algoritmů. Mechanická pojistka je řešena pomocí mikrovypínače spínaného kolečkem umístěným na hřídeli tyče. To ilustruje obr. 14. Ve funkční oblasti tj. asi $\pm 30^\circ$ od vodorovné polohy je v kolečku vybrání umožňující rozepnutí mikrovypínače, mimo tuto oblast je potom mikrovypínač sepnutý a přivádí napětí na logický pin BREAK obvodu LMD18200, tím je model zastaven bez ohledu na signály přicházející z řídicí karty.



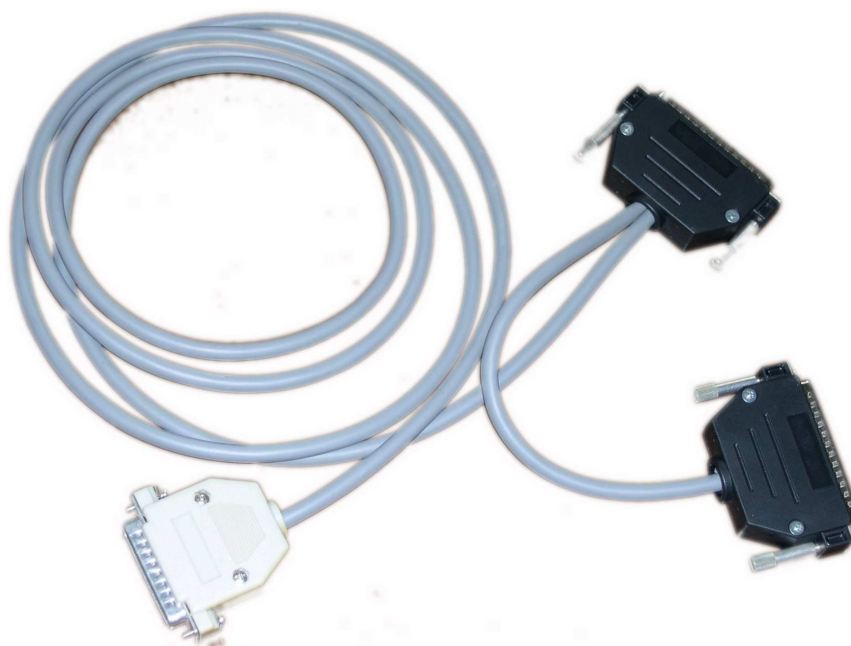
Obr. 14 - Pojistka proti přetočení

3.4. Kabeláž

Kabeláž k modelu tvoří na straně modulu konektor Canon 25 propojený 9 žilovým stíněným kabelem se dvěma konektory Canon 37, sloužícími pro připojení k řídicí kartě. Zapojení jednotlivých pinů je uvedeno v tabulce 2. Původně byly v konektoru X1 propojeny digitální a analogová země, to však vedlo k velkému zašumění signálů od analogových čidel. Toto bylo zcela vyřešeno odpojením digitální země. Ilustrace kabeláže je na obr 15.

CANON 25	CANON 37 – X1	CANON 37 –X2
Pin	Pin	Pin
1,14	28	-
2,13,15	9	19,29
3	12	-
4	31	-
5	30	-
6	-	31
9	1	-
16	4	-
21	3	-
22	2	-

Tab. 2 – zapojení kabeláže



Obr. 15 – kabeláž pro propojení modulu s řídicí kartou

4. ŘÍZENÍ

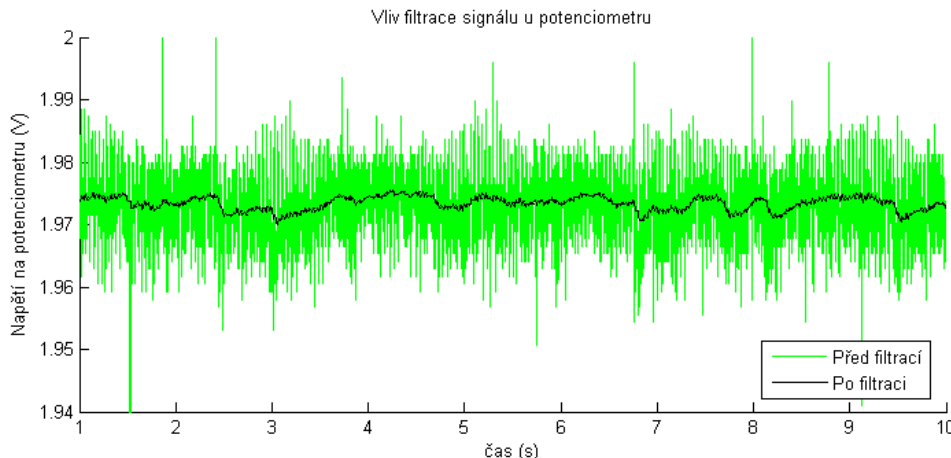
Za podstatnou část práce na modelu lze považovat tvorbu řízení. Pro řízení byla použita karta od firmy Humusoft, typ MF624 [14] v kombinaci se softwarem Matlab Simulink [15] a Realtime Toolboxem [16].

4.1. Filtrace signálů a kalibrace čidel

Dříve, než bylo přistoupeno k tvorbě řídicích algoritmů, bylo nutné patřičně upravit signály ze senzorů na tvar vhodný pro řízení. Model obsahuje pouze analogové senzory, což obecně představuje problém se šumem, který je produkován okolními zdroji elektromagnetického vlnění a je superponován na měřené výstupní napětí senzorů. Tento fakt je ještě výraznější vlivem velké vzdálenosti senzorů od řídicí karty. Protože se jedná zpravidla o vysokofrekvenční šum, jistého zlepšení lze dosáhnout použitím dolní propusti (více např. v [17]), realizované v Simulinku přenosovou funkcí ve tvaru (3).

$$G(s) = \frac{1}{\tau s + 1} \quad (3)$$

Konstanta τ představuje časovou konstantu filtru a její převrácená hodnota reprezentuje mezní frekvenci filtru. Zvolení nízké časové konstanty způsobí nedostatečnou filtraci, vysoká časová konstanta naopak způsobí při rychlé změně měřené veličiny dopravní zpoždění měřeného signálu. Po několika pokusech se jako ideální hodnota časové konstanty jeví 0,1s shodně pro všechny senzory použité na modelu. Vliv filtru je patrný z obrázku 16. K dalším úpravám měřených signálů potom patří přeškálování na požadovaný rozsah, popř. linearizace u nelineárních senzorů.



Obr. 16 – Vliv použití filtru u signálu z potenciometru

4.1.1. Potenciometr

Potenciometr slouží na modelu k měření natočení tyče. Jeho výstupem je napětí o velikosti 0-5V. Závislost odporu a tomu odpovídajícímu napětí na natočení je lineární. Pro úplné určení závislosti tedy stačí určit 2 dvojice natočení a tomu odpovídající napětí. Tyto byly určeny pro vodorovnou polohu a následně pro polohu kolmou v kladném směru otáčení. Získané hodnoty byly následující:

$$\varphi_0 = 0^\circ, U_0 = 1,995V$$

$$\varphi_1 = 90^\circ, U_1 = 3,355V$$

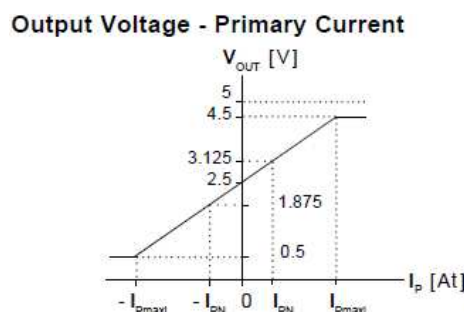
Převodní vztah pro potenciometr ve stupních a radiánech je tedy určen vztahy (4).

$$\begin{aligned}\varphi &= (U - 1,995V) \cdot 66,176^\circ \cdot V^{-1} \\ \varphi &= (U - 1,995V) \cdot 1,155V^{-1}\end{aligned}\quad (4)$$

4.1.2. Senzor proudu

Určení převodního vztahu pro senzor proudu je obdobné jako u potenciometru. Výrobce navíc udává strmost závislosti výstupního napětí na proudu senzorem, jak je patrné z obrázku 17. Hodnota nominálního proudu na primárním okruhu I_{PN} je dána zapojením senzoru a v našem případě činí 2A. Ze zkušeností je patrné, že nulová hodnota napětí odpovídající nulovému proudu se může od výrobcem udávaných 2,5V mírně lišit. V našem případě činí $U_0 = 2,503V$. Pro určení proudu tedy platí vztah (6).

$$I = (U - 2,503V) \cdot 3,2A \cdot V^{-1}\quad (6)$$

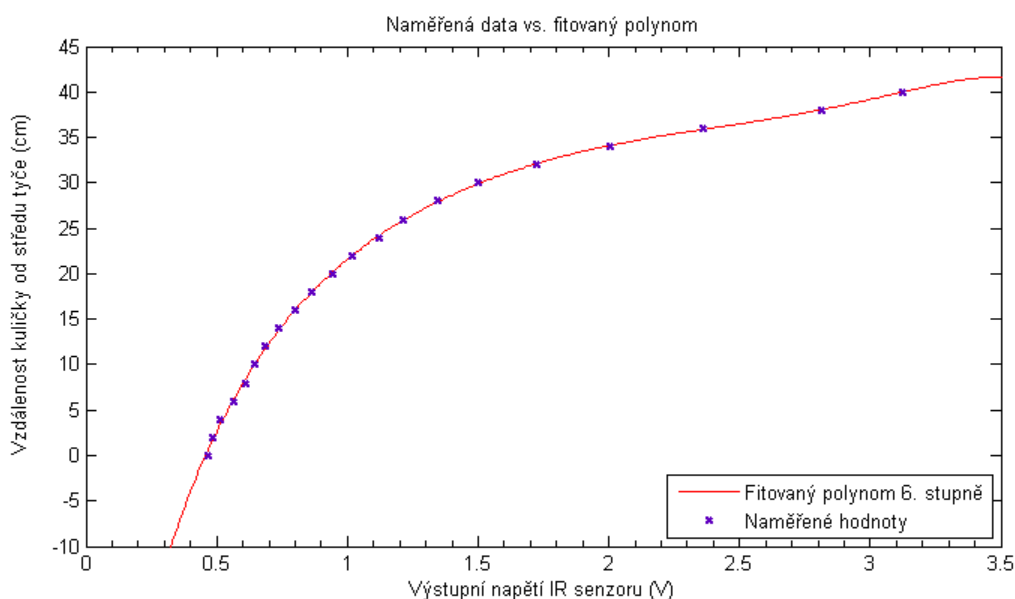


Obr. 17 – Převodní charakteristika napětí na proud (převzato z [12])

4.1.3. IR senzory vzdálenosti

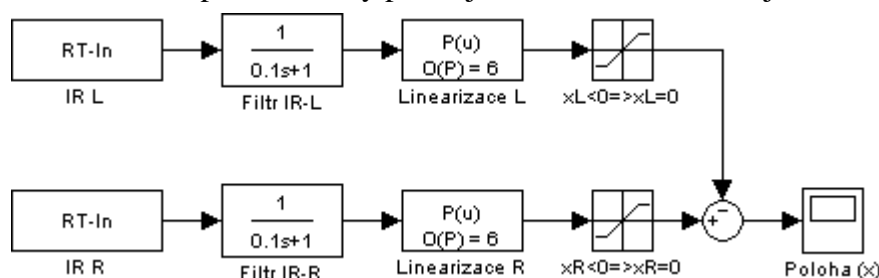
Určení převodního vztahu pro IR senzory je poněkud složitější. Vzhledem k tomu, že výstupní napětí závisí na vzdálenosti objektu nelineárně, bylo nutné experimentálně určit závislost napětí na vzdálenosti v několika bodech a vzniklým souborem dat proložit funkci, která spojitě určuje vzdálenost v závislosti na výstupním napětí senzoru. K tomuto účelu byl použit nástroj „curve fitting tool“ obsažený v softwaru Matlab. Původní záměr byl linearizovat data vzniklá rozdílem výstupních napětí obou senzorů obdobně jako v [3]. Postupně se ale ukázalo, že signály ze senzorů pro větší vzdálenosti zanášejí do měření zbytečný šum a funkce postihující průběh závislosti je velice složitá. Proto bylo rozhodnuto o linearizaci každého ze senzorů zvlášť pro vzdálenost odpovídající vzdálenosti senzoru od středu tyče. Průběh závislosti po několika pokusech nejlépe vystihl polynom 6. stupně, který naměřená data fituje s minimální chybou. Přepočtení napětí na vzdálenost od středu tyče v centimetrech určují vztahy (5). Náhled na přesnost zvoleného fittingu poskytuje obrázek 18.

$$\begin{aligned}x_L &= -0,5817 \cdot u_L^6 + 7,221 \cdot u_L^5 - 36,7 \cdot u_L^4 + 100,5 \cdot u_L^3 - 163,7 \cdot u_L^2 + 163,8 \cdot u_L - 48,89 \\ x_R &= -0,2173 \cdot u_R^6 + 3,65 \cdot u_R^5 - 23,82 \cdot u_R^4 + 80,14 \cdot u_R^3 - 151,9 \cdot u_R^2 + 163,8 \cdot u_R - 48,14\end{aligned}\quad (5)$$



Obr. 18 - Fitting

Pro získání celkové informace o poloze kuličky jsou proloženy funkce zespoda ohraničeny hodnotou 0. Teprve poté jsou obě hodnoty vzdáleností odečteny a tím vzniká celková informace o poloze kuličky. Řešení je patrné z obrázku 19. Ve skutečnosti to znamená, že na měření se v podstatě vždy podílí jen senzor, ke kterému je kulička blíže.



Obr. 19 – složení celkové informace o poloze

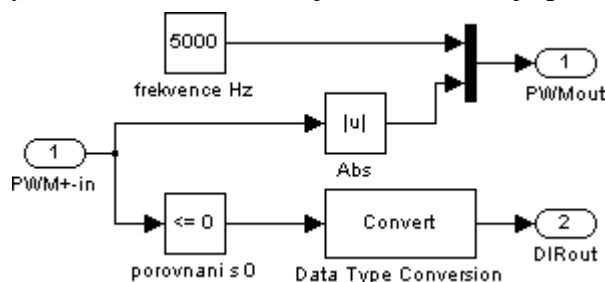
4.2. PID regulátor

V praxi se k řízení velice často používá PID regulátor. Jeho výhodou je možnost nastavení bez zevrubné znalosti parametrů soustavy a její dynamiky. Tento regulátor se tedy zdál jako ideální výchozí bod pro řízení celého modelu. Změna polohy kuličky závisí především na úhlu natočení tyče. Natočení tyče je regulováno napětím na motoru. Regulátor je tedy koncipován jako kaskádní se 2 stupni. První podřízený stupeň je polohový regulátor, řídicí natočení tyče pomocí napětí na motoru. Druhý nadřízený stupeň potom určuje žádanou polohu natočení v závislosti na poloze kuličky.

4.2.1. PID regulátor natočení

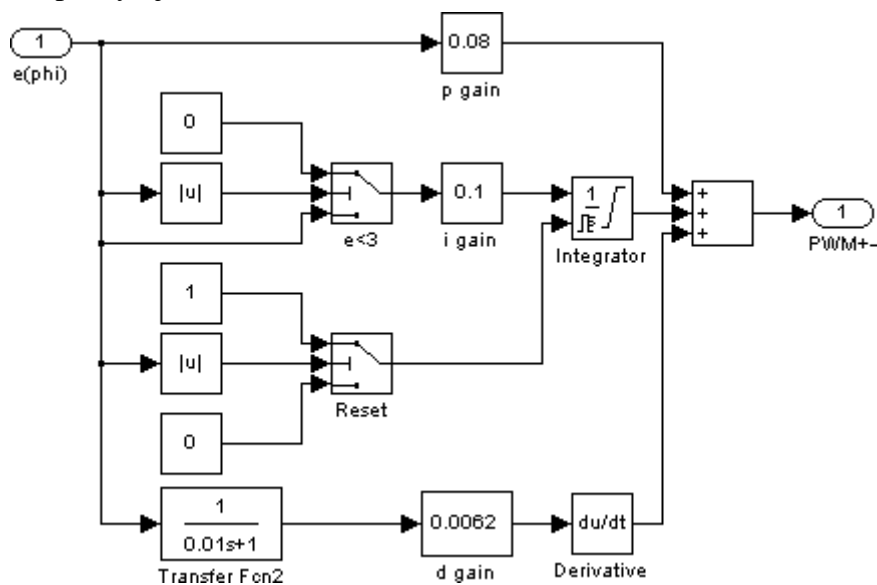
Prvním požadavkem pro řízení modelu bylo vytvořit spolehlivý regulátor natočení tyče. Toho bylo dosaženo použitím klasické koncepce PID regulátoru. Vstupem do regulátoru je regulační odchylka natočení získaná rozdílem žádaného natočení a natočení měřeného potenciometrem. Jednotkou natočení jsou z důvodu snadnějšího ladění stupně. Výstupem je potom zásah na motoru v rozmezí $\langle -1;1 \rangle$, kde znaménko určuje směr otáčení (logickou

hodnotu DIR) a absolutní hodnota střidu PWM. Při zvoleném napájecím napětí 12V to odpovídá napětí na motoru v rozmezí $\langle -12V; 12V \rangle$. O převod z rozsahu $\langle -1; 1 \rangle$ na střidu a směr se stará jednoduchý blok „Motor control“ jehož struktura je patrná z obr. 20.



Obr. 20 – převod na střidu a směr

Pro ladění zisků PID regulátoru byla použita metoda „pokus omyl“, kdy při sledování chování soustavy byly jednotlivé zisky nastaveny a doladěny na vyhovující hodnoty. Pokus o využití metody Ziegler-Nichols (více např. v [18]) ztroskotal a vedl k rozkmitání celé soustavy. Snaha omezit překmit při zachování veliké rychlosti regulace vedla k omezení funkce integrátoru na oblast s regulační odchylkou menší než 3° a použití poměrně velkého zisku. V jiném případě je integrátor vyřazen a naintegrovaná hodnota je resetována. Náhled na strukturu regulátoru poskytuje obrázek 21.



Obr. 21 – Vnitřní struktura PID regulátoru natočení

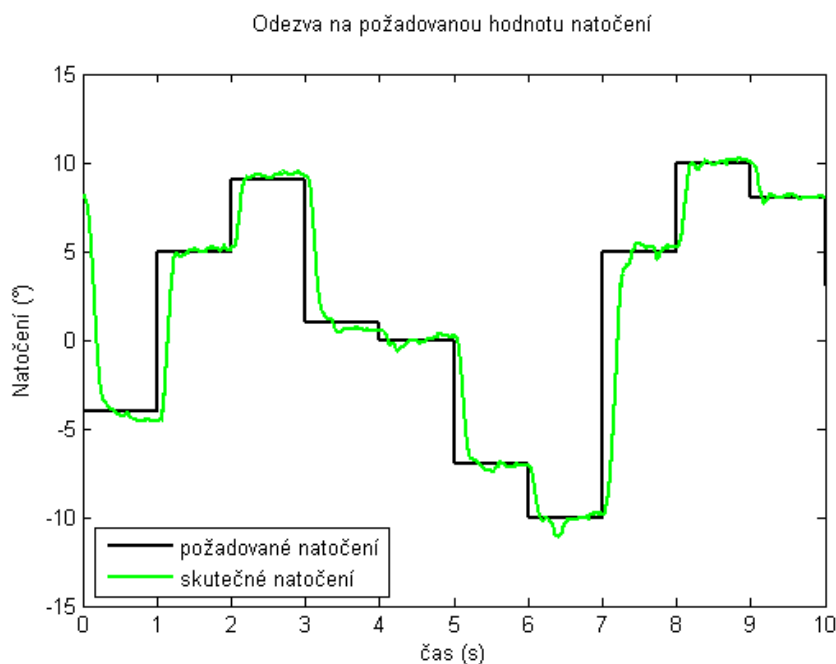
Nakonec byly zisky regulátoru dolazeny až na finální hodnoty:

$$K_p = 0,08$$

$$K_i = 0,1$$

$$K_d = 0,0062$$

Reakce na změnu požadovaného natočení je patrná z obrázku 22.



Obr. 22 – Odezva systému na změnu žádaného natočení

4.2.2. Nadřazený polohový PID regulátor

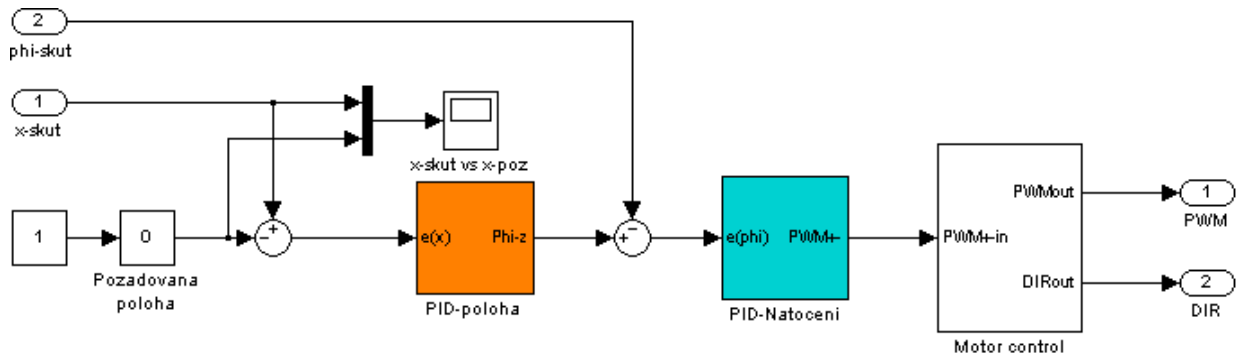
Jelikož změna polohy kuličky je závislá především na natočení tyče, je toto natočení potřeba řídit. K tomu slouží nadřazený PID regulátor, jehož vstupem je regulační odchylka získaná odečtením polohy určené IR senzory od žádané polohy. Výstupem regulátoru je pak žádané natočení ve stupních předávané podřazenému regulátoru. Zisky jednotlivých složek regulátoru byly určeny opět experimentálně. Stojí za to poznamenat, že u tohoto regulátoru hraje významnou roli derivační složka, zajišťující zastavení kuličky v dané poloze. Tato v podstatě vyvolává při přiblížení kuličky k žádané poloze vznik „brzdného“ natočení tyče úměrného rychlosti kuličky. Kmitání signálu od polohových senzorů bohužel znemožňuje použití vyššího zisku derivační složky zajišťujícího regulaci bez překmitu a vede ke kmitání soustavy. Proto je tato složka volena jako kompromis mezi překmitem a stabilitou systému. Naopak integrační složka nehraje vzhledem k malému valivému odporu kuličky příliš významnou roli, přesto je zastoupena, aby potlačila vlivy nesymetrie kuličky. Pro omezení přílišného překmitu je funkce integrátoru opět omezena na regulační odchylky menší než 10cm. Bez použití integrační složky se stávalo, že kulička zaujala stabilní polohu mírně mimo požadovanou polohu. Malý požadovaný úhel natočení PD regulátoru pak nedokázal odchylku doregulovat. Struktura regulátoru je tedy přibližně shodná s regulátorem natočení (viz kap. 4.2.1. resp. obr. 21) Zisky regulátoru byly nakonec určeny na:

$$K_p = 0,25$$

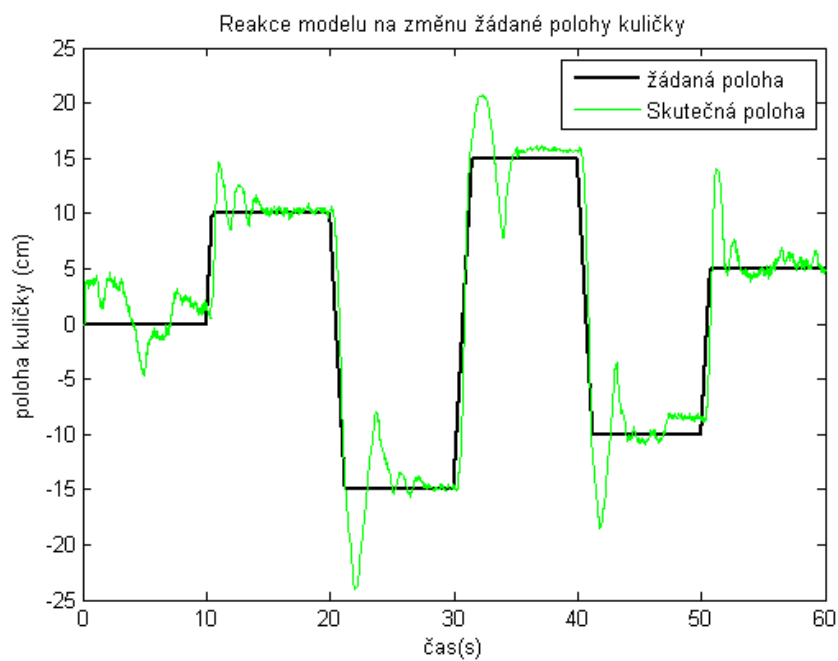
$$K_i = 0,25$$

$$K_d = 0,15$$

Schéma celého regulátoru realizovaného v Simulinku je na obrázku 23, porovnání skutečné polohy kuličky s požadavkem pak na obrázku 24.



Obr. 23 – Kaskádní PID regulátor v simulinku



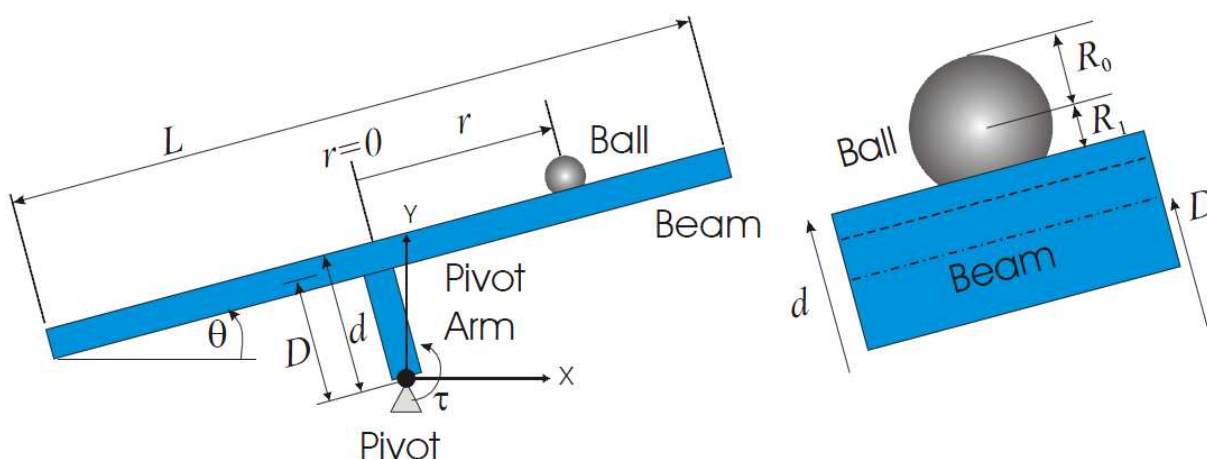
Obr. 24 – Celková odezva systému na změnu žádané polohy

5. ODHAD PARAMETRŮ MODELU

Pro použití pokročilejších metod řízení je již zapotřebí znát model soustavy a jeho parametry, které ho plně charakterizují. Řadu z těchto parametrů lze určit přímým měřením. Tyto jsou popsány v kap. 5.1. Další parametry vyžadují sofistikovanější přístup a jejich odhad je popsán v kap. 5.2.

5.1. Parametry určené přímým měřením

Parametry určené přímo jsou především rozměry a hmotnosti. Způsob jejich určení není třeba popisovat, snad až na určení polohy těžiště tyče. Tato poloha byla určena zavěšením tyče na strunu a současným spuštěním závaží z bodu závěsu tyče. Struna takto jednoznačně určila polohu těžiště ve vertikálním směru tyče, horizontální poloha je předpokládána ve středu tyče. Lepší představu o umístění jednotlivých rozměrů poskytuje obrázek 25.



Obr. 25 – Podstatné rozměry modelu (převzato z [19])

Dalším parametrem určeným přímo je rameno statického valivého odporu kuličky. Toto bylo zjištěno ze série 10 měření, kdy byl sledován úhel náklonu tyče, dokud se kulička nedala do pohybu. Rameno statického valivého odporu bylo následně určeno z rovnice (7) resp. po úpravě a pro malé sledované úhly (8). Určené parametry shrnuje tabulka 3.

Rovnice pro výpočet statického ramene valivého odporu:

$$m \cdot g \cdot \sin \varphi = m \cdot g \cdot \cos \varphi \cdot \frac{e_s}{R_1} \quad (7)$$

$$e_s = \varphi \cdot R_1 \quad (8)$$

Kde:	$m[\text{kg}]$	je hmotnost kuličky
	$g[\text{m}/\text{s}^2]$	je tíhové zrychlení
	$\varphi[\text{rad}]$	je natočení tyče
	$e_s[\text{m}]$	je rameno statického valivého odporu
	$R_1[\text{m}]$	je poloměr odvalování kuličky

Označení [jednotka]	Naměřená hodnota	Popis
$R_0[m]$	0,0305	Poloměr kuličky
$R_1[m]$	0,0295	Poloměr odvalování kuličky
$m[kg]$	0,022	Hmotnost kuličky
$M[kg]$	0,264	Hmotnost tyče
$d[m]$	0,020	Vzdálenost roviny odvalování kuličky od osy otáčení
$D[m]$	0,012	Vzdálenost těžiště tyče od osy otáčení
$e_s[m]$	0,000491	Statické rameno valivého odporu kuličky

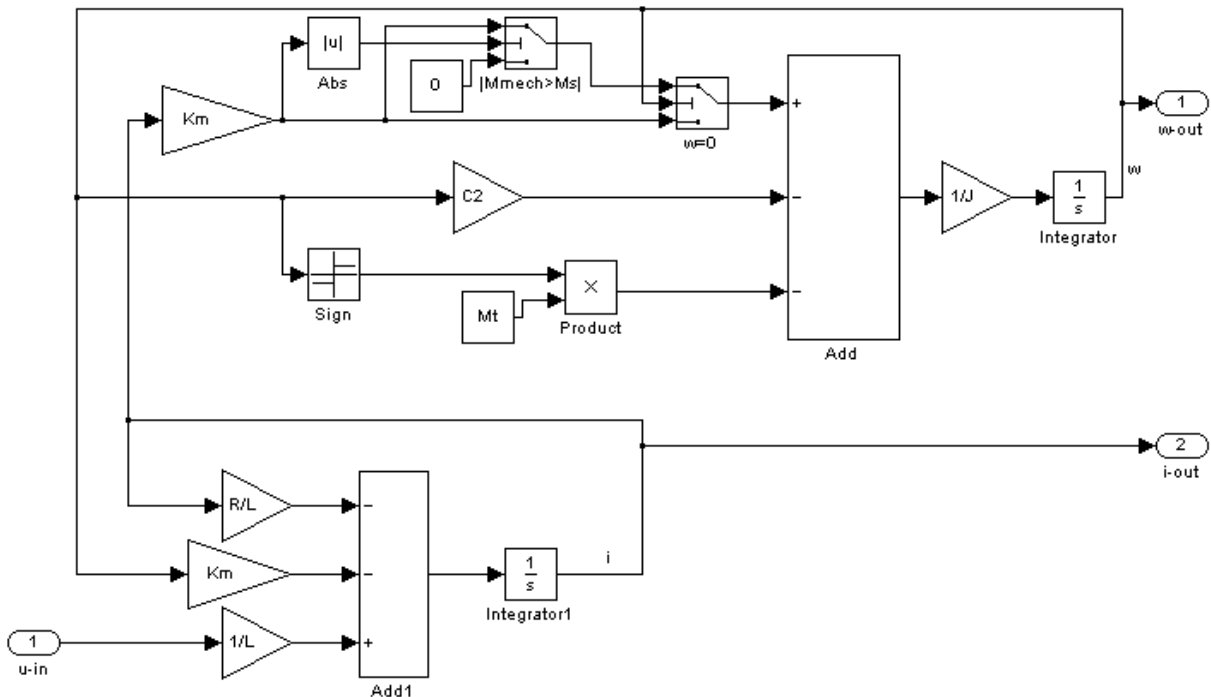
Tab. 3.- Parametry určené přímým měřením

5.2. Parametry určené odhadem

Některé parametry soustavy nebylo možné určit příliš snadno. Jedná se například o sdružený moment setrvačnosti tyče a motoru přepočtený na výstupní hřídel motoru, konstantu motoru, viskózní a suché tření v převodovce, odpory při valení kuličky a další. Pro určení těchto parametrů bylo nutné použít nástroj „parameters estimation tool” dostupný ze Simulinku. Protože odhad parametrů celého modelu by byl složitý a vyžadoval by komplexní model celého systému, byly vytvořeny dílčí modely pro odhadnutí parametrů jednotlivých částí.

5.2.1. Odhad parametrů motoru včetně tyče

Pro odhad parametrů motoru byl vytvořen jeho model, jehož struktura je patrná z obrázku 26. Tento model vychází ze základních rovnic pro motor (9), (10), (11), kde horní část představuje mechanický rozběh zahrnující jak suché a viskózní tření, tak i statický třecí moment. Dolní část modelu reprezentuje rovnicí popisující proud motorem.



Obr. 26 – model pro odhad parametrů motoru

Vztah mezi momentem a proudem pro stejnosměrný motor

$$M = K_m \cdot i \quad (9)$$

Kde: $M[Nm]$ je elektromechanický moment motoru

$K_m[Nm/A]$ je konstanta motoru

$i[A]$ je okamžitý proud motorem

Diferenciální rovnice popisující proud motorem:

$$\dot{i} = \frac{u - K_m \cdot \dot{\phi} - R_m \cdot i}{L_m} \quad (10)$$

Kde: $i[A]$ je okamžitý proud motorem

$u[V]$ je okamžité napětí na svorkách motoru

$K_m[Nm/A]$ je konstanta motoru

$\dot{\phi}[rad/s]$ je okamžitá úhlová rychlost motoru

$R_m[\Omega]$ je ohmický odpor motoru (odpor rotoru a odpor na kartáčích)

$L_m[H]$ je indukčnost vinutí motoru

Dynamický popis rozběhu motoru zahrnující ztráty:

$$J \cdot \ddot{\phi} = M - C_2 \cdot \dot{\phi} - M_t \quad (11)$$

Kde: $J[kg \cdot m^2]$ je celkový moment setrvačnosti motoru a tyče

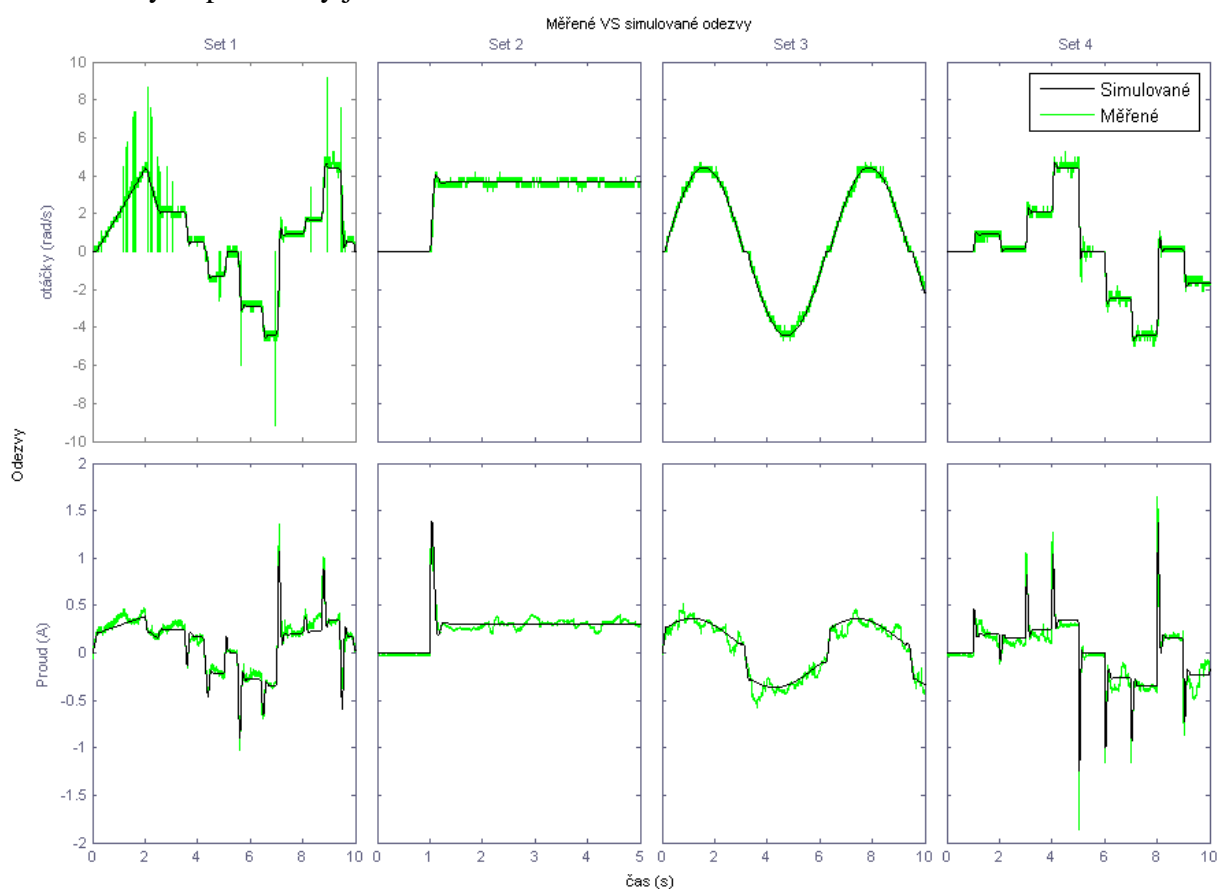
$\dot{\phi}[rad/s]$ je okamžitá úhlová rychlost motoru

$M[Nm]$ je elektromechanický moment vyvozený motorem

$C_2[Nm/(rad/s)]$ je koeficient viskózního tření v motoru a uložení tyče

$M_t[Nm]$ je suché tření v motoru a uložení tyče

Pro určení parametrů bylo na motor přivedeno napětí o známém průběhu. Proud motorem a otáčky byly měřeny a zaznamenány. Pro měření otáček byl použit enkodér, který dovolil měřit otáčky během protáčení tyče. Pro větší přesnost odhadu parametrů byly vytvořeny 4 sady dat pro různé průběhy vstupních napětí. Nástroj pro odhad parametrů nastaví parametry modelu tak, aby při stejném vstupu do modelu jeho výstup co nejpřesněji kopíroval měřený výstup reálné soustavy. Porovnání měřeného výstupu a výstupu modelu s odhadnutými parametry je na obrázku 27.



Obr. 27 – Měřené a simulované odezvy systému na změnu vstupního napětí

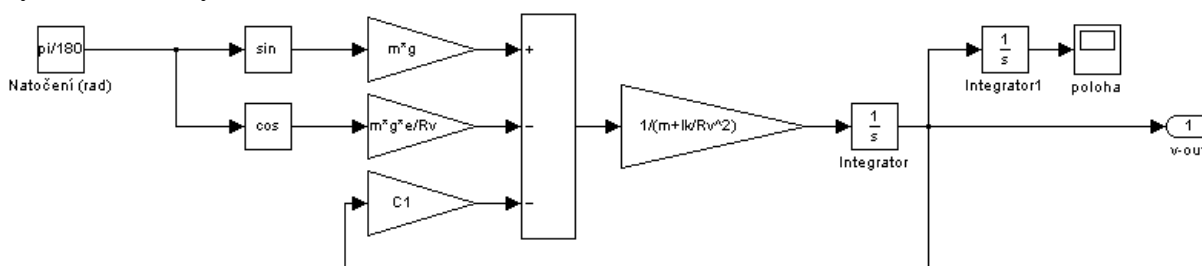
Neznámé konstanty byly tedy určeny pomocí odhadu parametrů a jejich hodnoty jsou zaznamenány v tabulce 4.

Označení [jednotka]	Naměřená hodnota	Popis
$C_2 [Nm / (rad / s)]$	0,0978	Koeficient viskózních ztrát při rotaci tyče
$M_t [Nm]$	0,3679	Moment suchého tření
$M_s [Nm]$	0,2199	Statický třecí moment
$K_m [Nm / A]$	2,3552	Konstanta motoru
$L_m [H]$	0,1298	Indukčnost vinutí motoru
$R_m [\Omega]$	4,3725	Odpor motoru
$J_{beam} [kg.m^2]$	0,0456	Moment setrvačnosti motoru s tyčí

Tab. 4 – konstanty určené odhadem parametrů motoru

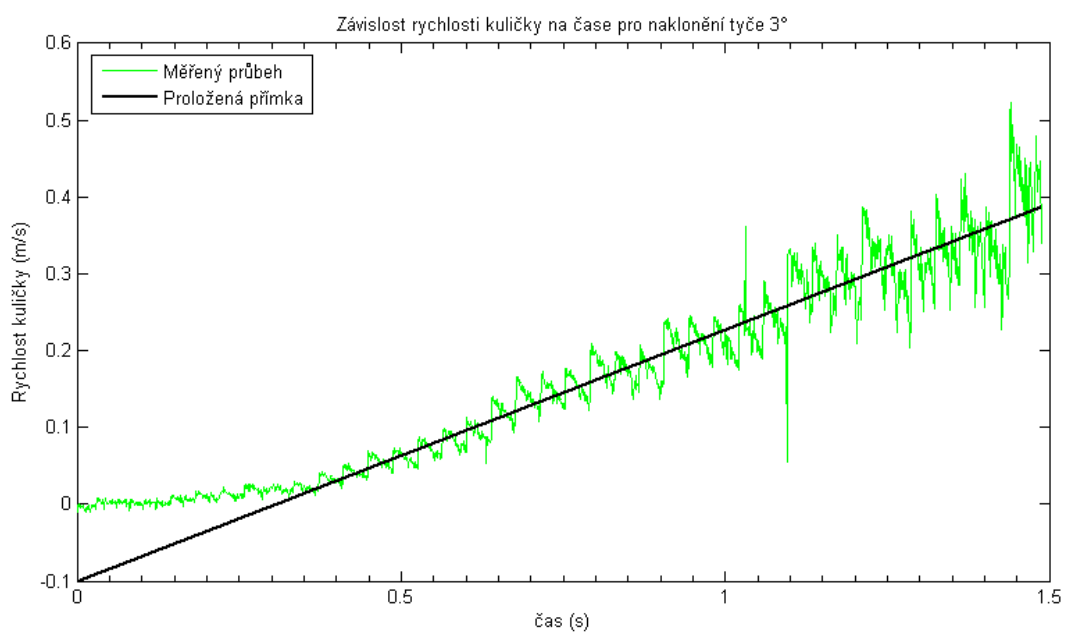
5.2.2. Odhad parametrů styku kulička-tyč

Další parametry modelu jsou stykové poměry kuličky a tyče. Statický valivý odpor kuličky byl určen experimentálně, zbývalo tedy určit rameno valivého odporu a viskózní ztráty při valení závislé na rychlosti kuličky. Další ztráty jako odpor vzduchu nebyly uvažovány. Pro určení těchto ztrát byl opět vytvořen jednoduchý model patrný z obrázku 28. Vstupem do modelu je nyní pouze konstantní úhel natočení tyče, za výstup je zvolena rychlost kuličky v závislosti na čase.



Obr. 28 – model pro odhad stykových poměrů mezi kuličkou a tyčí

Měření ovšem ukázalo, že popis pomocí ramene valivého odporu a viskózních ztrát nelze použít. Předpokladem bylo získání závislosti ve tvaru části narůstající exponenciály. Měřený průběh má však opačný průběh (viz obr. 29), což svědčí o tom, že odpor proti pohybu se s rostoucí rychlostí snižuje. Viskózní tření se zřejmě projeví až při vyšších rychlostech, kterých na tyči nelze dosáhnout. Pokus o nahrazení ztrát ramenem valivého odporu v oblasti lineárního nárůstu rychlosti taktéž selhal, protože pro rostoucí úhel náklonu tyče narůstalo i rameno valivého odporu. Popis ztrát při valení kuličky je tedy zřejmě dosti složitý a vyžádal by si delší čas pro zkoumání.



Obr. 29 – Závislost rychlosti kuličky na čase

6. ZÁVĚR

Úkolem práce byla tvorba, identifikace a řízení modelu „kulička na tyči“. S použitím dostupných prostředků byl sestaven model, který splňuje kladené požadavky. Byla provedena identifikace a sestaveno základní řízení pomocí PID regulátoru.

Tato práce byla mou první prací, kde jsem si mohl vyzkoušet vědomosti nabyté teoreticky v praxi. Získal jsem představu o tom jak složité může být měření stavů systému s ohledem na okolní rušení a další faktory. Zároveň jsem si vyzkoušel a zevrubně pochopil jaký vliv mají jednotlivé složky PID regulátoru na chování soustavy a jakou roli vlastně zastupují v řízení soustavy. Během identifikace parametrů jsem si ujasnil, jak komplikovaná může být otázka pasivních odporů. V neposlední řadě jsem nabyl spoustu zkušeností s programy Matlab a Simulink, které jsou standardem pro tvorbu řídicích algoritmů.

Je jasné, že řízení, které jsem vytvořil není dokonalé a je na něm ještě mnoho možností pro zlepšení. Na model by jistě šly aplikovat pokročilejší metody řízení jako například stavový regulátor. S tímto bylo také experimentováno, ale doladění by si zřejmě vyžádalo více času. Proto bych tento nelehký úkol rád přenechal svým následovníkům. Doufám, že jim můj model poslouží stejně dobře jako mně a pomůže jim nabýt představu o problematice aplikace teorie v praxi.

7. POUŽITÁ LITERATURA A DALŠÍ ZDROJE

- [1] iDNES.cz, *Provazochodec Manuel Berousek, který spadl z lana, zemřel*, [online], 18.5.2008, [cit. 2010-05], Dostupné z: <http://zpravy.idnes.cz/provazochodec-manuel-berousek-ktery-spادل-z-lana-zemrel-pk0-/krimi.asp?c=A080518_100739_krimi_miz>
- [2] TecQuipment, *CE106 Ball on Beam Apparatus*, [online datasheet], [cit. 2010-05-06], Dostupné z: <http://www.tecquipment.com/Datasheets/CE106_0808.pdf>
- [3] Evanko, D., Dorsett, A. *A Ball-on-Beam System with an Embedded Controller*, [online], Department of Electrical Engineering, University of North Florida, 2008-03, [cit. 2010-05], Dostupné z: <http://www.loyola.edu/betasites/cas/midatlanticasee/publications/march2008/documents/ASEE12008_0012_paper.pdf>
- [4] Control Tutorials for Matlab, *Example: Modeling the Ball and Beam Experiment*, [online], The University of Michigan, 1997-12-08, [cit. 2010-05], Dostupné z: <<http://www.engin.umich.edu/group/ctm/examples/ball/ball.html>>
- [5] Vojčinák, P.; Pieš, M.; Hájovský, R. *Návrh LQR řízení pro fyzikální model kulička na tyči*, [online] Diplomová práce na Vysoké škole Báňské, Technická univerzita v Ostravě, 2009, [cit. 2010-05], Dostupné z: <http://dsp.vscht.cz/konference_matlab/MATLAB09/prispevky/109_vojcinak.pdf>
- [6] Transmotec, *Planetary Gear DC motors 1W-40W, General Catalogue*, [online datasheet], 2009, [cit. 2010-05], Dostupné z: <http://www.transmotec.com/PDF/Catalogues/Motors_Planetary_Gear_DC_Catalogue_1W-40W.pdf>
- [7] Transmotec, *Planetary Gear DC motors 25W-500W, General Catalogue*, [online datasheet], 2009, [cit. 2010-05], Dostupné z: <http://www.transmotec.com/PDF/Catalogues/Motors_Planetary_Gear_DC_Catalogue_25W-500W.pdf>
- [8] RotaSet Controls, R22P/R22PC, [online datasheet], [cit. 2010-05] Dostupné z: <http://www.rotaset.de/r22p_engl.pdf>
- [9] SHARP, *GP2Y0A21YK0F Distance Measuring Sensor Unit, Measuring distance: 10 to 80 cm, Analog output type*, [online datasheet], [cit. 2010-05] Dostupné z: <http://sharp-world.com/products/device/lineup/data/pdf/datasheet/gp2y0a21yk_e.pdf>
- [10] National Semiconductor, *LMD18200, 3A, 55V H-Bridge*, [online datasheet], 2005, [cit. 2010-05], Dostupné z: <<http://www.national.com/ds/LM/LMD18200.pdf>>
- [11] McManis, Chuck. *H-Bridges: Theory and Practice*, [online], 2006-12-23, [cit. 2010-05], Dostupné z: <<http://www.mcmanis.com/chuck/robotics/tutorial/h-bridge/>>
- [12] LEM, Current Transducer LTS 6-NP, [online datasheet], 2007-01-29, [cit. 2010-05], Dostupné z www: <<http://www.lem.com/docs/products/lts%206-np%20e.pdf>>

- [13] Zouhar, František, *Konstrukce a výroba výukového modelu „Vrtulník se dvěma rotory“*. Brno, 2009. 52 s., 6 s. příloh., Bakalářská práce na Fakultě strojního inženýrství Vysokého Učení Technického v Brně na Ústavu mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí bakalářské práce Ing. Robert Grepl Ph.D
- [14] Humusoft, MF 624 Multifunction I/O Card, [manuál online], 2006, [cit. 2010-05], Dostupné z: <<http://www2.humusoft.cz/www/datacq/manuals/mf624um.pdf>>
- [15] The MathWorks, *Simulink – Simulation and Model-Based Design*, [online], [cit. 2010-05], Dostupné z: <<http://www.mathworks.com/products/simulink/?BB=1>>
- [16] Humusoft, *Real Time Toolbox*, [online], [cit. 2010-05], Dostupné z: <<http://www.humusoft.cz/produkty/rtt/>>
- [17] Kolektiv autorů, *Low-Pass filter*, [online], 2010-05-10, [cit. 2010-05-12], Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/Low-pass_filter>
- [18] Tomas, B. *Ziegler-Nichols Method*, [online], Michigan Technological University, 2004-02-13, [cit. 2010-05], Dostupné z: <<http://www.chem.mtu.edu/~tbco/cm416/zn.html>>
- [19] Cazzolato, Ben. *Derivation of the Dynamics of the Ball and Beam System*, [online], School of mechanical engineering, The University of Adelaide, 2007-11, [cit. 2010-05], Dostupné z: <http://www.mecheng.adelaide.edu.au/robotics_novell/projects/2007/BallBeam/Ball%20and%20beam%20dynamics.pdf>