



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

LABORATORNÍ MODEL RUČNÍHO MANIPULÁTORU S KOMPENZACÍ ZÁTĚŽE

THE EDUCATIONAL MODEL OF A HAND-OPERATED BALANCED MANIPULATOR

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Lukáš Letrik

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Roman Adámek

BRNO 2021

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student:	Lukáš Letrik
Studijní program:	Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor:	Mechatronika
Vedoucí práce:	Ing. Roman Adámek
Akademický rok:	2020/21

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:

Laboratorní model ručního manipulátoru s kompenzací zátěže

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V průmyslu se již delší dobou používají ručně ovládané manipulátory umožňující kompenzovat tíhu zdvihaného břemene, čímž výrazně eliminují fyzické namáhání obsluhy tohoto manipulátoru. Cílem bakalářské práce bude navrhnout algoritmus pro kompenzaci tíhy závaží, používaný právě u těchto manipulátorů, a dále postavit laboratorní model, na kterém bude daný algoritmus otestován.

Cíle bakalářské práce:

- Provedte rešerši na téma ručně ovládaných manipulátorů s kompenzací zátěže. V rešerši mimo jiné uveďte různé typy používaných konstrukčních provedení, režimů ovládání a použité senzory.
- Na základě rešerše navrhnete vhodnou koncepci manipulátoru a řídicí algoritmus, který bude schopen kompenzovat tíhu závaží, odhadovat jeho hmotnost a zároveň bude umožňovat ruční manipulaci s břemenem v jedné ose, při současné kompenzaci jeho tíhy. Funkčnost této koncepce nejdříve ověřte v simulaci.
- Pro zvolenou koncepci vyberte vhodný motor, senzory, výkonovou a řídicí elektroniku. Manipulátor zkonstruujte a pro jeho řízení použijte výše zmíněný algoritmus.
- Na ukázkové úloze dokažte funkčnost manipulátoru.

Seznam doporučené literatury:

ARAKELIAN, Vigen a Sébastien BRIOT. Balancing of Linkages and Robot Manipulators [online]. Cham: Springer International Publishing, 2015 [cit. 2020-09-18]. Mechanisms and Machine Science. ISBN 978-3-319-12489-6. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-319-12490-2.

PREVIDI, Fabio, Federico FICO, Sergio M. SAVARESI, Damiano BELLOLI a Ivan PESENTI. Direct design of a velocity controller and load disturbance estimation for a self-balancing industrial manual manipulator. *Mechatronics* [online]. 2012, 22(8), 1177-1186 [cit. 2020-09-18]. ISSN 09574158. Dostupné z: doi:10.1016/j.mechatronics.2012.10.003.

GREPL, Robert. *Kinematika a dynamika mechatronických systémů*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007. ISBN 978-80-214-3530-8.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá návrhem a sestavením jednoduchého jednoosého ručně ovládaného kompenzátoru váhy neboli HOBM (Hand-Operated Balanced Manipulator). Rešeršní část je věnována historii HOBM, základním mechanismům mechanických HOBM, různým typům pohonů používaných pro HOBM a jejich nejznámějším výrobcům. Praktická část práce je zaměřena na simulaci, konstrukci a naprogramování jednoosého HOBM pro výukové účely. Práce je zakončena vyhodnocením funkčnosti zkonstruovaného jednoosého HOBM a návrhem dalších možností pro jeho vylepšení. Součástí práce je seznam použitých součástí, které byly využity pro konstrukci, a jejich datasheety s příloženými skripty, která zahrnují simulaci a program pro řízení manipulátoru. Tyto dokumenty jsou umístěny v příloze.

Summary

This bachelor's thesis deals with a draft and an assembly of a simple uni-axial HOBM (Hand-Operated Balanced Manipulator). The research part is dedicated to the history of HOBM, basic mechanisms of mechanic HOBMs, different types of propulsion used for HOBM and their most renowned producers. The practical part of this thesis is focused on simulation, construction and programming of uni-axial HOBM for educational purposes. The thesis is concluded with an evaluation of the functionality of the constructed uni-axial HOBM and improvement proposals. Part of the thesis is also a list of used components, which were used for construction, and their datasheets with attached scripts, which comprise of a simulation and a program for operating the uni-axial HOBM. These documents are enclosed.

Klíčová slova

HOBM (Hand-Operated Balanced Manipulator), řízení jednoosého HOBM, BLDC

Keywords

HOBM (Hand-Operated Balanced Manipulator), controlling uni-axial HOBM, BLDC

Bibliografická Citace

LETRIK, Lukáš. *Laboratorní model ručního manipulátoru s kompenzací zátěže* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-19]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132746>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí práce Roman Adámek.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci *Laboratorní model ručního manipulátoru s kompenzací zátěže* vytvořil sám pod vedením Ing. Romana Adámka, s použitím materiálů uvedených v seznamu literatury.

Lukáš Letrik

v Brně dne

.....

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Romanu Adámkovi za pomoc při zpracovávání této práce. Dále bych rád poděkoval rodině a přátelům za podporu během studia.

Obsah

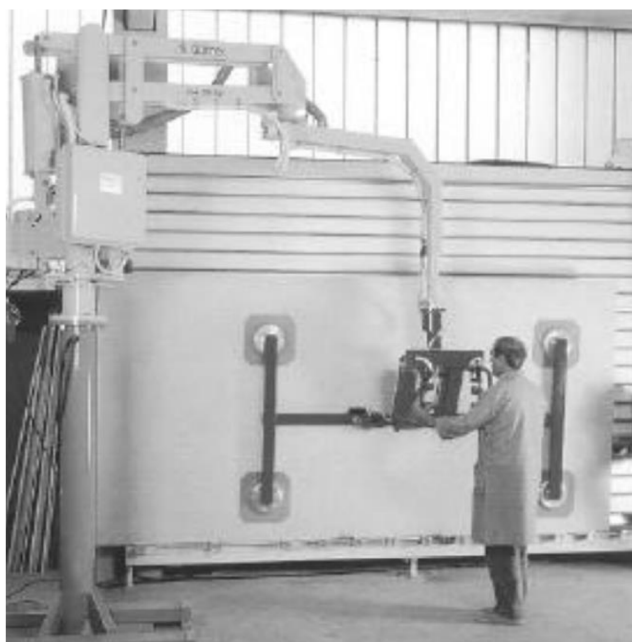
1	Úvod.....	9
2	Cíle práce	10
2.1	Formulace cílů.....	10
3	Hand-Operated Balanced Manipulator (HOBM).....	7
3.1	Historie HOBM.....	7
3.2	Princip fungování HOBM založeném na pantografovém mechanismu.....	7
3.3	HOBM na principu pružin	8
3.4	Typy pohonů HOBM	9
3.5	Senzorika HOBM.....	9
3.6	Pracovní módy	10
3.7	Výrobci HOBM.....	10
4	Simulace jednoosého HOBM	11
4.1	Schéma mechanismu	11
4.2	Rovnice pro jednoosý HOBM.....	12
4.3	Odvození rovnic pro měření zátěže na hřídeli motoru.....	14
4.4	Simulace na základě rovnic pro jednoosý HOBM.....	15
5	Konstrukce jednoosého HOBM.....	18
5.1	Komponenty pro sestavení jednoosého HOBM.....	18
5.2	Propojení jednotlivých částí jednoosého HOBM.....	20
6	Programování jednoosého HOBM	22
6.1	Programování ESCON 50/5 jednotky	22
6.2	Programování jednoosého HOBM v Simulinku	22
7	Další vývoj.....	27
8	Závěr.....	28
	Použité informační zdroje	29

Seznam symbolů.....	31
Seznam zkratk	32
Seznam obrázků.....	33
Seznam tabulek	34
Seznam příloh.....	35
Elektronické přílohy	35

1 Úvod

Od počátku světa člověk vykonává manuální činnosti týkající se jeho každodenního života, ke kterým neodmyslitelně patří také přemísťování věcí z jednoho místa na druhé, a to tak, aby efektivita práce byla co nejvyšší. Proto v historii člověka nalezneme zařízení, která proces přemísťování předmětů pomáhala ulehčovat (např. páka, kladkostroj). Díky těmto malým krůčkům lidstvo dospělo k myšlence mechanického kompenzátoru váhy, kdy už se nejednalo jen o pouhé přemístění závaží, ale také o komfortní manipulaci s těžkými břemeny za použití co nejmenší lidské energie [1].

Tento proces vedl ke vzniku mnoha společností, které se zabývají vývojem a konstrukcí ručně ovládaných kompenzátorů vah. Tyto již moderní stroje nedisponují jen komfortním ovládním, ale také bezpečností práce. Dále u nich lze nalézt různorodý výběr konstrukcí, efektorů a váhových kategorií, které umožnily ulehčit a zpříjemnit širokou škálu povolání, a tím také vytvořit nové pracovní pozice.



Obrázek 1.1: Příklad ručně ovládaného kompenzátoru váhy [1]

2 Cíle práce

Hlavním cílem bakalářské práce je navržení jednoosého ručně ovládaného kompenzátoru váhy pro laboratorní účely. To zahrnuje jednotlivé subcíle, které jsou součástí bakalářské práce:

2.1 Formulace cílů

1. Provést rešerši na téma ručně ovládaných manipulátorů s kompenzací zátěže. V rešerši uvést různé typy používaných konstrukčních provedení, režimů ovládání a použité senzorky.
2. Na základě rešerše navrhnout vhodnou koncepci manipulátoru a řídicí algoritmus, který bude schopen kompenzovat tíhu závaží, odhadovat jeho hmotnost, a zároveň bude umožňovat ruční manipulaci s břemenem v jedné ose při současně kompenzaci jeho tíhy. Funkčnost této koncepce nejdříve ověřit v simulaci.
3. Pro zvolenou koncepci vybrat vhodný motor, senzorku, výkonovou a řídicí elektroniku. Zkonstruovat manipulátor a pro jeho řízení použít výše zmíněný algoritmus.
4. Na ukázkové úloze dokázat funkčnost manipulátoru.

3 Hand-Operated Balanced Manipulator (HOBM)

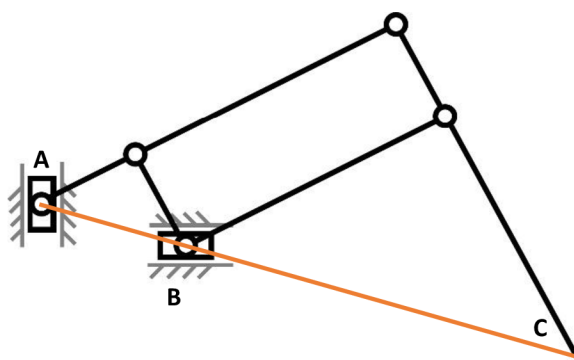
Ručně ovládaný kompenzátor váhy (Hand-Operated Balanced Manipulator, HOBM) je stroj, který kompenzuje tíhu závaží a usnadňuje manipulaci se závažím, a to do takové míry, že člověk vykonává jen minimální práci. Využívá se nejen tehdy, když je použití průmyslových robotů drahé a v konečném důsledku neefektivní, ale také, pokud je zapotřebí přemísťovat těžké objekty pomocí maximální automatizace. Těmto požadavkům vyhovuje kooperace HOBM s LWR (Light Weight Robot) [17]. S kompenzátory váhy se lze setkat například v automobilovém průmyslu, kde se používají při montáži dveří na auto [1].

3.1 Historie HOBM

Éra ručně ovládaných kompenzátorů váhy byla započata v roce 1964, kdy Robert A. Olsen navrhl nový originální způsob vyvažování zátěže na principu pantografového mechanismu (Obrázek 3.1). Tento přelomový návrh se stal předlohou pro Reizou Matsumoto, který v roce 1975 vytvořil první prototyp ručně ovládaného kompenzátoru váhy [1].

3.2 Princip fungování HOBM založeném na pantografovém mechanismu

První ručně ovládaný kompenzátor váhy fungoval na principu pantografového mechanismu (Obrázek 3.1). Tento mechanismus umožňoval velký rozsah pohybu bodu C pro malé posuvy bodu A a bodu B. Pokud je vyžadován pohyb v horizontálním směru bodu C, může se realizovat pouze horizontálním posuvem bodu B (a ekvivalentně vertikálním posuvem bodu A). Toto však platí pouze za podmínky, že všechny tři body A, B a C leží na stejné přímce [1].

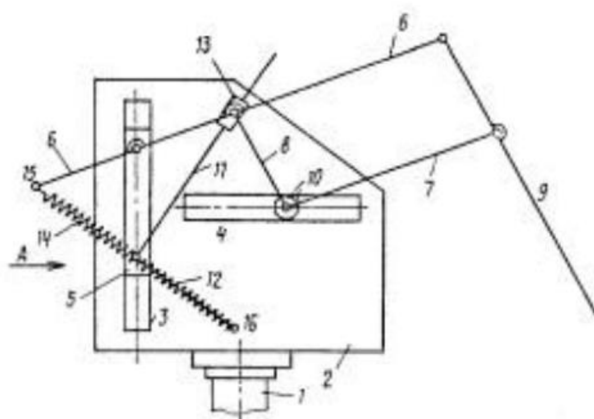


Obrázek 3.1: Schéma pantografového mechanismu

Pokud je vyžadována manipulace s pantografovým mechanismem v horizontálním směru bez dodávání práce, je zapotřebí, aby byl mechanismus vyvážený kolem osy, která vede bodem A. Poté je zapotřebí dodat pouze práci k překonání třecích sil ve vazbách. Podobného stavu však nejde docílit u vertikálního posunutí, proto se zde musí zavést vhodný řídicí systém v bodě A, který je schopen vyvážit váhu zavěšeného objektu.

3.3 HOBM na principu pružin

Jak bylo uvedeno výše, základní HOBM pracují na principu vyvážení v ose procházející bodem A. Vyvažující moment je proporcionálně závislý na posunutí a tohoto poznatku se využilo při konstrukci HOBM na principu pružin. Pružiny mají rovněž proporcionální charakteristiku při natažení, proto bylo logickým krokem zkombinování těchto dvou zařízení (Obrázek 3.2) [2].



Obrázek 3.2: Pružinový HOBM [1]

3.4 Typy pohonů HOBM

Pro různá využití HOBM se používají různé typy pohonů. V průmyslu se lze setkat s manipulátory, které obsahují elektrický, pneumatický nebo hydraulický pohon. Tyto pohony se dělí do váhových kategorií. Pro manipulátory s nosností do 150 kg se používají pohony elektrické (Obrázek 3.3) nebo pneumatické (Obrázek 3.4). Dále u manipulátorů do nosnosti 500 kg se používají pohony elektrické, a pokud se jedná o manipulátor s nosností až 2500 kg, jsou použity motory hydraulické [2].



Obrázek 3.3: Ukázka HOBM s elektrickým pohonem [3]



Obrázek 3.4: Ukázka HOBM s pneumatickým pohonem [4]

3.5 Senzorika HOBM

HOBM jakožto stroje, které kompenzují váhu, potřebují precizně regulovat jednotlivé veličiny tak, aby byl pohyb manipulovaným objektem plynulý, a zároveň také bezpečný (především u HOBM s vysokou nosností). Splnění těchto požadavků je docíleno vhodným výběrem senzorů a jejich vhodným umístěním.

Senzory měření zatížení jsou asi jednou z nejdůležitějších součástí těchto strojů. Díky nim algoritmus dokáže vyhodnotit, jaká váha je zavěšena na efektoru HOBM, a zařízení je následně schopno tuto váhu vykompenzovat zvětšením momentů na motorech. U elektrických pohonů jsou to senzory, které měří proud motorem a zasílají tuto informaci o proudu do řídicího kontroleru, ze které je následně dopočítána hmotnost. U pneumatických pohonů je namísto senzoru měření proudu použitý tlakový senzor [13].

Hlavní interakci s uživatelem umožňuje kontrolní panel umístěný na efektoru HOBM. Tento kontrolní panel posílá informace od uživatele do řídicí jednotky, která určí, jak se má HOBM v konkrétní situaci zachovat. Jedna z nejdůležitějších funkcí tohoto panelu je zaznamenat přítomnost uživatele na základě držení madel, která se zjišťuje pomocí laserové brány umístěné v madlu. Tedy pokud madla nejsou držena, laserová brána není protnuta, nastává regulace na pozici a HOBM se nepohybuje. V tomto stavu je také možné změnit hmotnost zavěšeného závaží [15].

Řízení některých ručně ovládaných kompenzátorů vah je značně ovlivněno měřením váhy, které se provádí při regulaci na pozici. Proto, aby tato regulace byla co nejpreciznější, používají se především senzory zvané enkodéry, které posílají signálové pulsy do řídicí jednotky, a tím ji informují o aktuální pozici manipulátoru.

3.6 Pracovní módy

Každý výrobce ručně ovládaných kompenzátorů vah má různé konstrukční provedení, a tudíž i ovládání kompenzátorů je odlišné, proto budou uvedeny jen hlavní módy, které ovlivňují bezpečnost práce s těmito stroji a jejich komfortní ovládání.

Jedním ze základních módů je měření váhy. U velkého počtu HOBM tento mód chybí z důvodu, že jsou určeny na práci s konkrétním závažím. Pokud by uživatel chtěl změnit hmotnost závaží, musel by ji přenastavit softwarově. Jiné HOBM tento problém řeší již zmíněným módem měření váhy, který zaručuje komfort práce s různě těžkými objekty [11].

Pokud to efektor umožňuje, je možné zavěšené závaží natáčet v osách vedoucí efektořem. Díky tomuto módu je uživatel schopen umístit závaží do takové polohy, aby jeho následná montáž nebo umístění bylo snadné a pohodlné bez dalšího nutného zásahu uživatele [12].

Kdyby nastal náhlý výpadek proudu, mohla by nastat situace, kdy by těžké zavěšené závaží spadlo na zem, popřípadě by došlo ke zranění osoby nacházející se poblíž zařízení. Proto jsou některé HOBM vybaveny brzdou. Při vypadnutí elektřiny se tento HOBM uzamkne a čeká, až bude opět k dispozici elektřina [16], nebo se také tato situace řeší záložním zdrojem přímo implementovaným v HOBM.

Posledním důležitým módem je regulace na pozici. Tento stav nastává tehdy, když uživatel pustí kontrolní panel HOBM z důvodu montáže zavěšeného závaží.

Aby byl HOBM bezpečným strojem a nedošlo ke zranění uživatele, je požadováno, aby se v takové situaci závažím nepohybovalo, proto se stroj přepne do módu regulace na pozici, která toto zajistí, a ani při zvětšení nebo zmenšení zatížení se pozice nezmění a nedojde tak ke zranění nebo kolizi s okolními objekty [14].

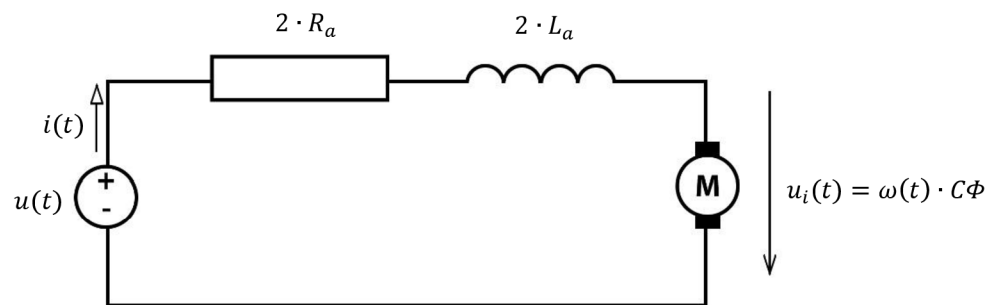
3.7 Výrobci HOBM

Ručně ovládané kompenzátory váhy již neodmyslitelně patří do moderního průmyslu 21. století a našly si uplatnění v nejrůznějších odvětvích. To dalo prostor k zakládání firem, které se zabývají výrobou a distribucí těchto strojů po celém světě. Výrobu HOBM lze najít v Itálii (Dalmec, Indeva), Japonsku (Balaman, MY, HBL, SA), USA (Conco Balancer), Německu (Auto-Balancer), Švýcarsku (Muscle), Rusku (KCH), Bulharsku (MPB), nebo také v České republice (RMS) [1].

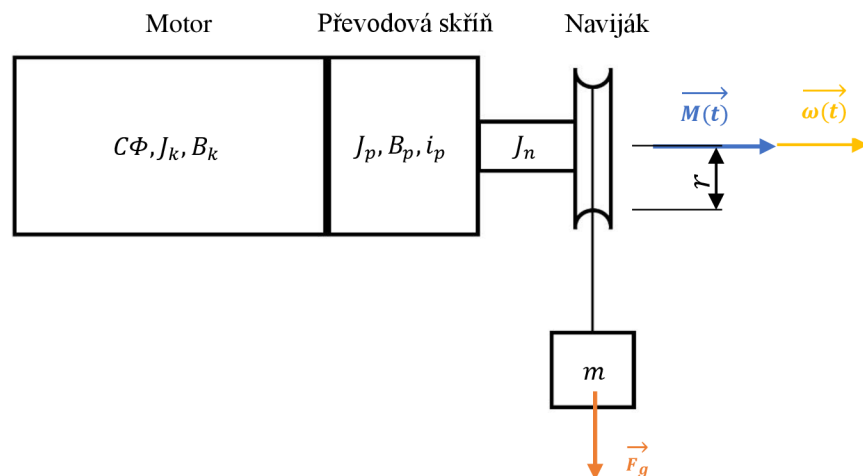
4 Simulace jednoosého HOBM

4.1 Schéma mechanismu

Pro vytvoření schémat bylo použito schéma BLDC motoru (Obrázek 4.1), který byl vybrán jako pohon pro jednoosý ručně ovládaný kompenzátor váhy (jednoosý HOBM). Rovněž mechanické schéma (Obrázek 4.2) vychází z konstrukce tohoto zařízení.



Obrázek 4.1: Elektronické schéma BLDC motoru



Obrázek 4.2: Mechanické schéma jednoosého HOBM

Vysvětlivky ke schématům:

$u(t)$	[V]	Napětí od zdroje přivedené na motor
$i(t)$	[A]	Proud tekoucí motorem
R_a	[Ω]	Odpor vinutí
L_a	[H]	Indukčnost vinutí
$u(t)$	[V]	Indukované napětí na motoru
$C\Phi$	[Nm/A]	Momentová konstanta motoru
$\omega(t)$	[rad/s]	Úhlová rychlost motoru
J_k, J_p, J_n	[kgm ²]	Momenty setrvačnosti
B_k, B_p	[Nms]	Tlumení
i_p	[-]	Převodový poměr převodovky
m	[kg]	Hmotnost závaží
$M(t)$	[Nm]	Moment na hřídeli motoru
F_g	[N]	Tíhová síla od závaží
r	[mm]	Poloměr navijáku

4.2 Rovnice pro jednoosý HOBM

V předchozí kapitole jsou uvedena schémata pro jednoosý HOBM, ze kterých se následně sestavily rovnice určené pro simulaci. Tyto rovnice popisují chování jednoosého HOBM na základě změny zavěšeného závaží na navijáku, napětí na motoru, proudu, rychlosti a zrychlení.

4.2.1 Rovnice elektrického obvodu jednoosého HOBM

Tyto rovnice jsou sestaveny z elektronického schématu jednoosého HOBM (Obrázek 4.1) a to tak, že napětí na jednotlivých součástkách se sčítá podle druhého Kirchhoffova zákona o napětích.

$$\begin{aligned} u(t) &= 2 \cdot R_a i(t) + 2 \cdot L_a \frac{di(t)}{dt} + u_i(t) = \\ &= 2 \cdot R_a i(t) + 2 \cdot L_a \frac{di(t)}{dt} + \omega(t) \cdot C\Phi \end{aligned} \quad (4.1)$$

$$M(t) = C\Phi \cdot i(t) \quad (4.2)$$

4.2.2 Rovnice mechanického schémata pro jednoosý HOBM

Tato rovnice vznikla za použití Langrangeových rovnic druhého druhu (4.3).

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_k}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial E_k}{\partial q_i} + \frac{\partial E_D}{\partial \dot{q}_i} + \frac{\partial E_p}{\partial q_i} = \frac{\partial W}{\partial \dot{q}_i} = \frac{\partial A}{\partial q_i} \quad (4.3)$$

$$E_k = \frac{1}{2} J_c \dot{q}^2 \rightarrow \frac{\partial E_k}{\partial \dot{q}_i} = J_c \dot{q} \rightarrow \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_k}{\partial \dot{q}_i} \right) = J_c \frac{d\dot{q}}{dt}; \quad \frac{\partial E_k}{\partial q_i} = 0 \quad (4.4)$$

$$E_D = \frac{1}{2} B_c \dot{q}^2 \rightarrow \frac{\partial E_D}{\partial \dot{q}_i} = B_c \dot{q} \quad (4.5)$$

$$E_p = 0 \rightarrow \frac{\partial E_p}{\partial q_i} = 0 \quad (4.6)$$

$$W = M(t)\dot{q} - M_0\dot{q} \rightarrow \frac{\partial W}{\partial \dot{q}_i} = M(t) - M_0 \quad (4.7)$$

Po dosazení je výraz následovný:

$$M(t) = J_c \frac{d\omega(t)}{dt} + B_c \cdot \omega(t) + M_0 \quad (4.8)$$

$$J_m = m \cdot r^2 \quad (4.9)$$

$$J_c = J_k + J_p + J_n + J_m \quad (4.10)$$

$$B_c = B_k + B_p \quad (4.11)$$

$$M_0 = r \cdot g \cdot m \quad (4.12)$$

4.3 Odvození rovnic pro měření zátěže na hřídeli motoru

Přímé měření hmotnosti závaží, které je zavěšené na hřídeli motoru, není možné. Proto je zvolena možnost dopočítání hmotnosti díky diferenciální momentové rovnici jednoosého HOBM (4.8) a lineární závislosti momentu a proudu (4.2).

$$M(t) = (J_k + J_p + J_n + m \cdot r^2) \frac{d\omega(t)}{dt} + B_c \cdot \omega(t) + r \cdot g \cdot m \quad (4.13)$$

$$\begin{aligned} C\Phi \cdot i(t) - (J_k + J_p + J_n) \frac{d\omega(t)}{dt} - B_c \cdot \omega(t) \\ = \left(r \cdot g + r^2 \cdot \frac{d\omega(t)}{dt} \right) \cdot m \end{aligned} \quad (4.14)$$

$$m = \frac{C\Phi \cdot i(t) - (J_k + J_p + J_n) \frac{d\omega(t)}{dt} - B_c \cdot \omega(t)}{\left(r \cdot g + r^2 \cdot \frac{d\omega(t)}{dt} \right)} \quad (4.15)$$

Je zřejmé, že vztah pro měření hmotnosti závisí na rychlosti a zrychlení motoru (4.15). Toto měření lze provádět, jen pokud známe dostatečně přesně momenty setrvačnosti, tlumení a parametry motoru, čehož u reálné úlohy nemusí být docíleno. Proto je druhý příklad měření váhy za podmínky nulové rychlosti, tím se vztah (4.15) značně zjednoduší a odpadne podmínka znát přesné parametry jednoosého HOBM. Výsledný vztah vypadá následovně:

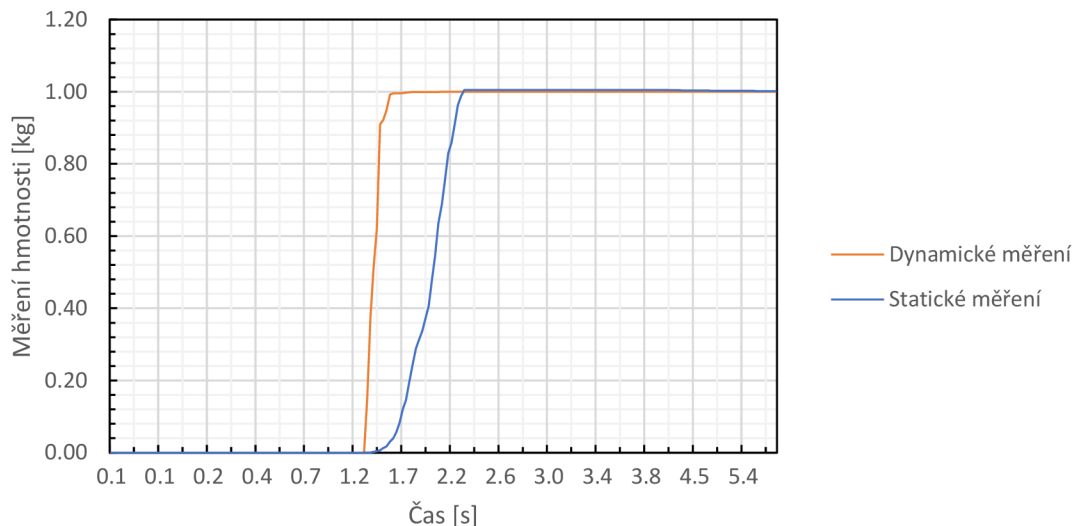
$$m = \frac{C\theta \cdot i(t)}{r \cdot g} \quad (4.16)$$

4.4 Simulace na základě rovnic pro jednoosý HOBM

Rovnice a vztahy odvozené v přechozí kapitole jsou převedeny do prostředí Simulink [8], kde se simulují různé stavy, které mohou nastat v reálném prostředí pro zkonstruovaný jednoosý HOBM, a to proto, aby se dokázalo předejít chybě v konstrukci nebo programu. Následující odstavce popisují výsledky této simulace. Vstupní parametry pro tuto simulaci jsou uvedeny v datasheetech, a také vycházejí ze samotné konstrukce jednoosého ručně ovládaného kompenzátoru váhy. Veškeré informace jsou uvedeny v přílohách.

4.4.1 Měření hmotnosti závaží

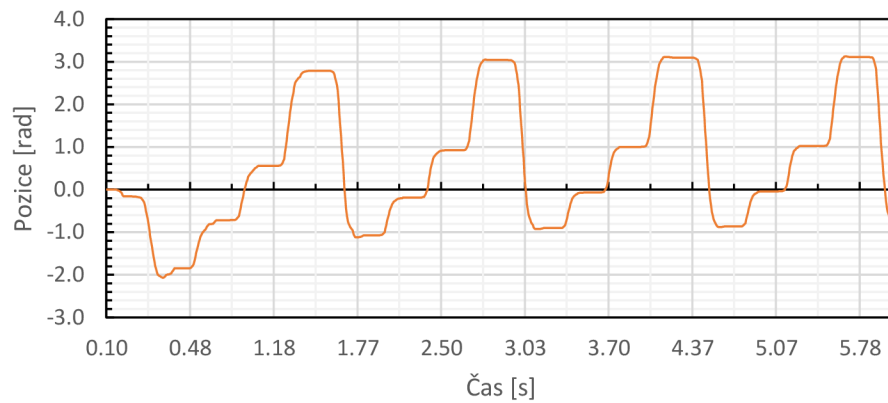
V této kapitole budou ukázány výhody a nevýhody jednotlivých měření a vybrání vhodné metody pro reálnou aplikaci jednoosého ročně ovládaného kompenzátoru váhy. Měření probíhalo při zavěšeném závaží o hmotnosti 1 kg. První měření probíhalo při konstantní pozici rotoru, díky které se odstranily členy momentové diferenciální rovnice (4.8) závislé na změně pozice rotoru.



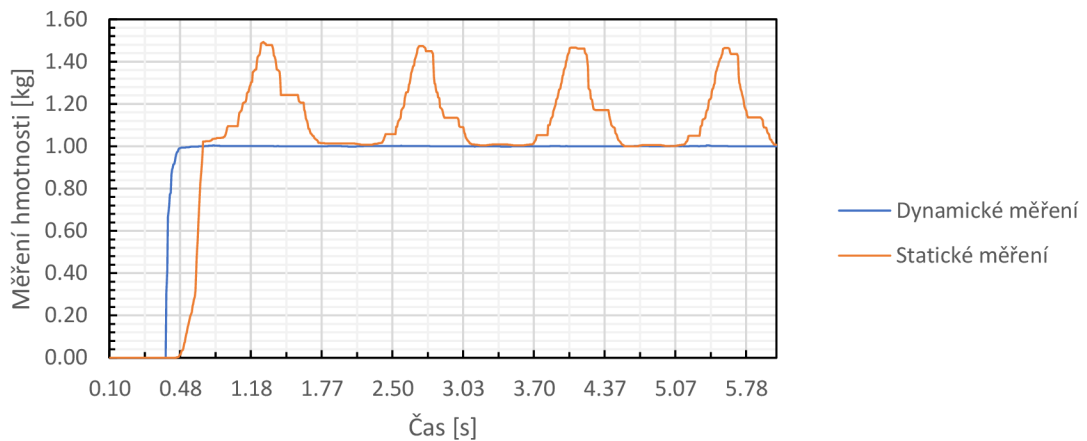
Obrázek 4.3: Měření hmotnosti závaží při konstantní pozici rotoru.

Na obrázku 4.3 jsou vidět závislosti měřené hmotnosti na čase. Porovnává se dynamické měření váhy se statickým. Skok v obou měřeních je způsobený počáteční inicializací simulace, kdy při spuštění se nepočítá se zavěšeným závažím. Je zřejmé, že dynamické měření váhy proběhlo rychleji než statické, tudíž lze předpokládat lepší funkčnost měření při využití jednoosého ručně ovládaného kompenzátoru váhy v praxi.

V dalším měření se měnila pozice rotoru pomocí bloku Repeating Sequence Stair, a proto se zde musí uvažovat úplná momentová diferenciální rovnice (4.13). Pro detailnější vstupní parametry viz příloha.



Obrázek 4.4: Porovnání měření hmotnosti závaží při změně polohy rotoru

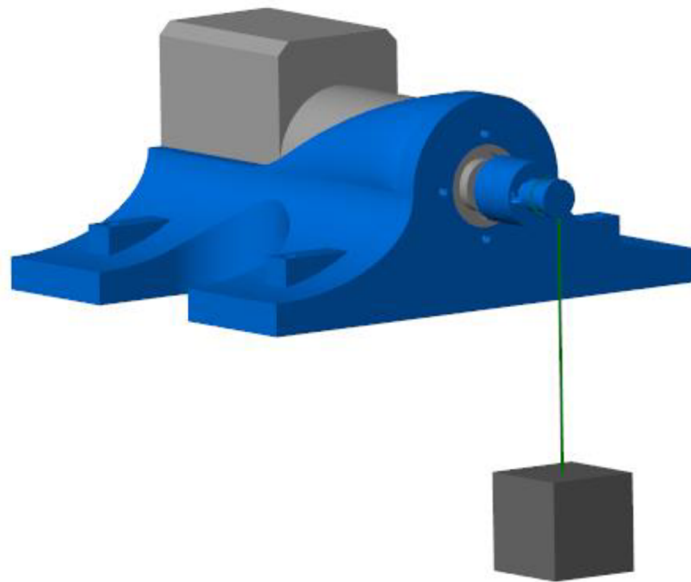


Obrázek 4.5: Porovnání způsobů měření hmotnosti závaží

Obrázek 4.4 znázorňuje změnu pozice rotoru v čase a obrázek 4.5 ukazuje měření hmotnosti závaží dynamicky a staticky v závislosti na čase. Jde vidět, že statické měření hmotnosti selhává, a to právě díky zanedbání členů momentové diferenciální rovnice (4.13) závislé na změně pozice a rychlosti. Z obrázků 4.3, 4.4 a 4.5 lze vidět výhoda dynamického měření váhy.

4.4.2 Vizualizace jednoosého HOBM

Sestavení vizualizace se realizovalo pomocí toolboxu Simscape Multibody Link [9], který umožňuje konvertovat projekt vytvořený v Inventoru do Simulinku. Vytvořená sestava v Inventoru, která obsahuje součásti s vazbami se vyexportuje do Simulinku pomocí tlačítka „Export Simscape Multibody...“, které se nachází v záložce „Add-Ins“. Již v exportovaném simulinkovém souboru se přidají chybějící komponenty a vazby (např. lano navijáku, závaží). Nakonec je nutné vytvořit propojení mezi simulací a vizualizací. To se realizuje nastavením pozice navijáku ze simulace.



Obrázek 4.6: Vizualizace jednoosého HOBM

5 Konstrukce jednoosého HOBM

5.1 Komponenty pro sestavení jednoosého HOBM

5.1.1 Motor

Jednou z hlavních částí konstrukce je vhodný pohon, a to takový, aby ztráty v suchém tření a proudové ztráty byly minimální. Jeho parametry nesmí být předimenzované. Toto souvisí s požadavkem, aby byl tento model použitý jako laboratorní model, tzn., že nosnost zařízení by neměla překročit 10 kg.

Jak již bylo zmíněno, pro HOBM s nízkou nosností se používají elektrické pohony, proto bylo vybíráno z této skupiny motorů. Použitým pohonem se stal bezkartáčový stejnosměrný motor EC 45 Ø45 mm, bezkartáčový, 150 Watt s číslem 36198, a to především díky jeho dostupnosti a z důvodu absence kartáčů, které způsobují proudové ztráty a ztráty třením. Tento model také přímo obsahuje zabudovaný enkodér pro zjišťování polohy, který byl rovněž důležitým požadavkem z důvodu přesné regulace na pozici.



Obrázek 5.1: Motor EC 45 Ø45 mm, bezkartáčový, 150 Watt s číslem 36198, [5]

5.1.2 ESCON 50/5

Jedná se o kontroler přímo učený pro motory od firmy Maxon. Zařízení v tomto případě bude ovládat BLDC motor, a to vhodným přepínáním cívek motoru na základě signálů z hallových sond, které jsou implementovány v motoru. Také ESCON 50/5 [6] umožňuje přesné měření proudu, které je důležité pro měření hmotnosti.

5.1.3 Humusoft Karta MF624

Jelikož se má jednat o laboratorní model jednoosého HOBM, byla použita karta MF624 od firmy Humusoft [7] z důvodu dostupnosti na školních počítačích, které jsou využívány pro výuku studentů. Karta MF624 je multifunkční I/O karta, která slouží k propojení stolního počítače s dalšími elektronickými komponenty (např.: motor, LED, enkodér atd.).

5.1.4 Zdroj

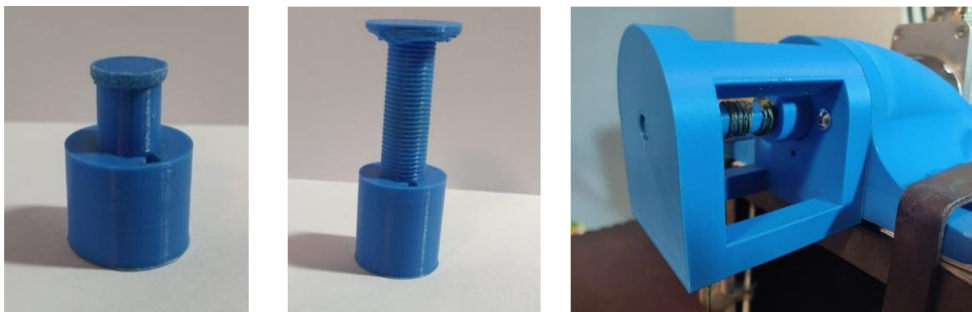
Protože motor má parametry 24 V a 360 W [5] a ESCON 50/5 50 V a 250 W [6], hledal se laboratorní zdroj s výkonem přibližně 250 W. S ohledem na maximální zatížení jednoosého ručně ovládaného kompenzátoru váhy se zvolila možnost laboratorního zdroje od firmy Manson, NTP-5531, který má parametry 36 V a 100 W [10], což je pro tuto úlohu dostačující.

5.1.5 Tištěné 3D součástky

Pro konstrukci nezbytných mechanických součástek byl zvolen 3D tisk z důvodu snadné změny parametrů dané součástky, pokud by to bylo zapotřebí. Tyto součástky byly navrženy v Autocad Inventor Profesional 2021, a dále převedeny do .stl formátu pro 3D tisk.

5.1.6 Návrh navijáku

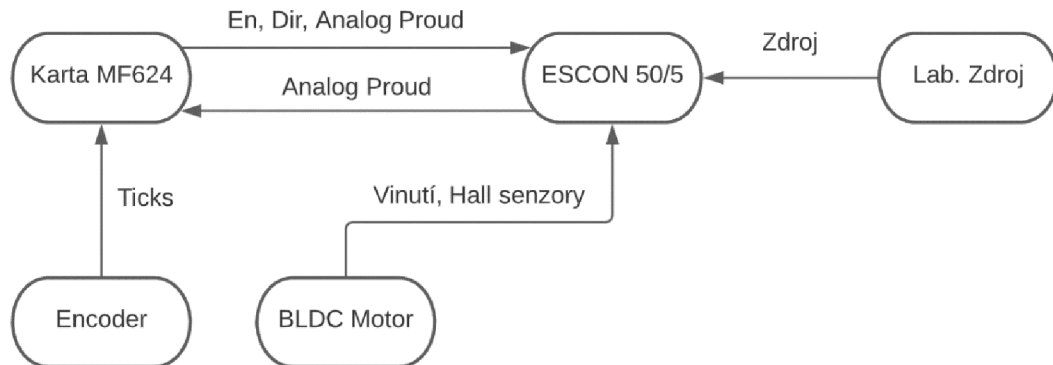
Naviják jednoosého ručně ovládaného kompenzátoru váhy byl navržen s požadavkem vysoké odolnosti a minimálního průhybu při zatížení. Také disponuje závitem, který brání lanku, aby se navíjelo přes sebe (tím by se měnil moment na hřídeli motoru).



Obrázek 5.2: Prototypy navijáků od prvního k finálnímu modelu

5.2 Propojení jednotlivých částí jednoosého HOBM

Pro lepší představu je nejdříve uvedeno blokové schéma propojení mezi jednotlivými částmi jednoosého ručně ovládaného kompenzátoru váhy. Následující obrázek 5.3 ukazuje jednoduché propojení mezi zdrojem, motorem, ESCON 50/5, kartou MF624 a enkodérem.



Obrázek 5.3: Blokové schéma zapojení jednoosého ručně ovládaného kompenzátoru váhy

Propojení jednotlivých částí záleželo na požadavcích řízení jednoosého HOBM a na vytvoření uživatelského prostředí v Simulinku. K provozu BLDC motoru je zapotřebí připojení cívek BLDC motoru a hallových sond k ESCON 50/5 a to tak, aby názvy jednotlivých vodičů navzájem odpovídaly (Tabulka 5.3). Ke kontrole samotného motoru je nutné ovládat stavy „vypnuto“/„zapnuto“, směr, protékající proud motorem a měření proudu na motoru. Toto řízení se realizuje skrze komunikaci mezi kartou MF624 a ESCON 50/5. Propojení těchto dvou částí je uvedeno v tabulce 5.1. Aby byla možná regulace na pozici, je nutné zajistit propojení mezi enkodérem a kartou MF624. Toto propojení je popsáno v tabulce 5.2. Posledním krokem je propojení mezi ESCON 50/5 a samotným laboratorním zdrojem (Tabulka 5.4).

MF624					ESCON 50/5			
Patice	Pin	Jméno pinu	Funkce		Patice	Pin	Jméno pinu	Funkce
X1	30	D OUT 0	EN	→	J5	2	D IN 2	EN
	31	D OUT 1	DIR	→		3	D IN 3	DIR
	32	D OUT 2	BREAK	→		4	D IN 4	BREAK
	1	A/D 0	IN proud	←	J6	5	D/A 1	OUT proud
	20	D/A 0	OUT proud	→		1	A/D 1 +	IN proud

Tabulka 5.1: Propojení mezi Humusoft Kartou MF624 a ESCON 50/5

MF624					ENKODÉR		
Patice	Pin	Jméno pinu	Funkce		Barva	Pin	Funkce
X2	28	+5 V	Zdroj	→	bílá	2	Vcc 5 VDC
	29	GND	Země	→	hnědá	3	GND
	1	IRC0A+	A+ kanál	←	zelená	5	A+ kanál
	2	IRC0A-	A- kanál	←	žlutá	6	A- kanál
	3	IRC0B+	B+ kanál	←	šedá	7	B+ kanál
	4	IRC0B-	B- kanál	←	růžová	8	B- kanál
	5	IRC0I+	I+ kanál	←	modrá	9	I+ kanál
6	IRC0I-	I- kanál	←	červená	10	I- kanál	

Tabulka 5.2: Propojení mezi kartou Humusoft MF624 a enkodérem motoru

Motor					ESCON 50/5		
Patice	Pin	barva	Funkce		Patice	Pin	Jméno pinu
Vynutí	1	bílá 1	vynutí 1	←	J2	1	vynutí 1
	2	bílá 2	vynutí 2	←		2	vynutí 2
	3	bílá 3	vynutí 3	←		3	vynutí 3
Hall senzory	1	bílá	Hall senzor 1	→	J3	1	Hall senzor 1
	2	hnědá	Hall senzor 2	→		2	Hall senzor 2
	3	zelená	Hall senzor 3	→		3	Hall senzor 3
	4	žlutá	GND	←		5	GND
	5	šedá	Vhall 4.5...24VDC	←		4	+5 VDC

Tabulka 5.3: Propojení mezi motorem a ESCON 50/5

Zdroj				ESCON 50/5		
barva	Jméno pinu			Patice	Pin	Jméno pinu
černá	GND	→	J1	-		GND
červená	+24 VDC	→		+		+10 ... +50 VDC

Tabulka 5.4: Propojení mezi zdrojem a ESCON 50/5

6 Programování jednoosého HOBM

6.1 Programování ESCON 50/5 jednotky

Aby BLDC motor mohl být řízený následným algoritmem z Humusoft karty MF624, je potřebné také naprogramovat samotnou řídicí jednotku pro řízení BLDC motoru. Programování probíhá v programovacím prostředí vytvořeném firmou Maxon, ESCON Studio. Byly využity funkcionality k auto naladění proudového regulátoru a nastavení vstupů patřičným způsobem.

6.2 Programování jednoosého HOBM v Simulinku

Když je konstrukce hotová a všechny součásti mezi sebou propojeny, může se přejít na samotné programování jednoosého HOBM, které spočívá v diskretizaci části kódu simulace, doladění regulátorů a experimentů, které umožnily zpřesnit měření váhy. Také bylo nutno co nejprecizněji zjistit parametry motoru, aby se následně jednoosý ručně ovládaný kompenzátor váhy choval co nej přesněji. Bohužel proměření parametrů motorů nebylo možné díky nedostatečné ESCON 50/5, která nedovedla měřit napětí na motoru. Proto se proměřil pouze odpor vinutí, který souhlasil s uvedenou hodnotou v datasheetu. Zbývající parametry byly převzaty ze stejného datasheetu.

6.2.1 Regulace na pozici

V tomto stavu se motor reguluje na určitou pozici díky regulátoru, který zahrnuje jak odchylku chtěné pozice od naměřené pozice, tak i odchylku proudu z důvodu rychlejší proudové změny (narozdíl od změny pozice). Rychlé regulace na pozici je docíleno zařazením PID bloku, který je vhodně naladěný pro tuto úlohu.

Měření hmotnosti se dá provádět, jak již bylo zmíněno, dynamicky nebo staticky, ale z důvodu nepřesných parametrů motoru je zvoleno právě měření statické, kdy je motor v klidovém stavu. Pokud se závaží na navijáku nachází v požadované pozici, je rotor motoru v klidovém stavu, a tehdy se měří předběžná hmotnost závaží zavěšeného na navijáku. Pro tento výpočet je použita rovnice 3.16.

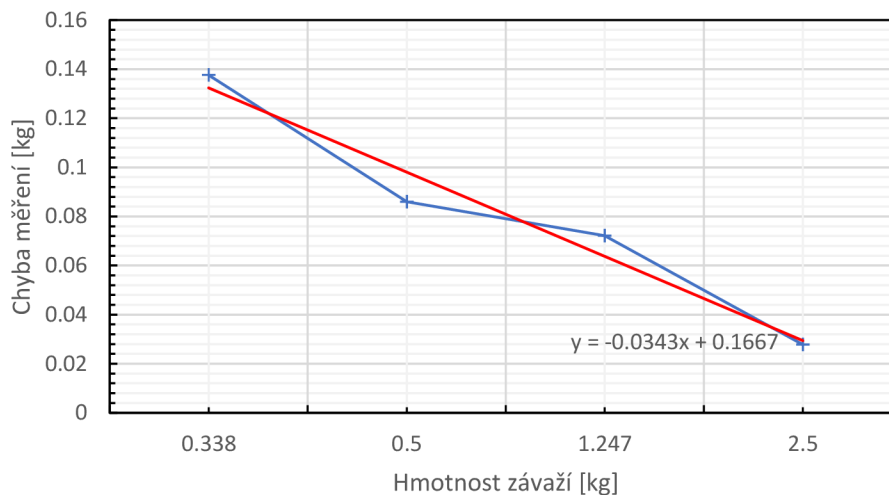
6.2.2 Měření hmotnosti závaží

Z důvodu nepřesných parametrů motoru je pro reálný jednoosý ručně ovládaný kompenzátor váhy vhodnější měřit hmotnost závaží staticky. Proto je realizováno měření hmotnosti ve stavu regulace na pozici, a i tak není dostatečně přesné, a to buď z důvodu suchého tření v ložiscích motoru a navijáku, nebo také z nepřesné regulace.

Proto jsou vytvořeny dvě metody pro zpřesnění měření, a to statistickým vyhodnocením chyby měření pro různé hmotnosti a „UpDownMass“ metody.

a) Statistické měření hmotnosti závaží

Toto měření vychází ze statického měření chyby, kdy se proměří jednotlivé hmotnosti a určí se trend chyby. Díky známému průběhu chyby můžeme dopočítat skutečnou hmotnost závaží.



Obrázek 6.1: Chyba měření hmotnosti závaží a její trend

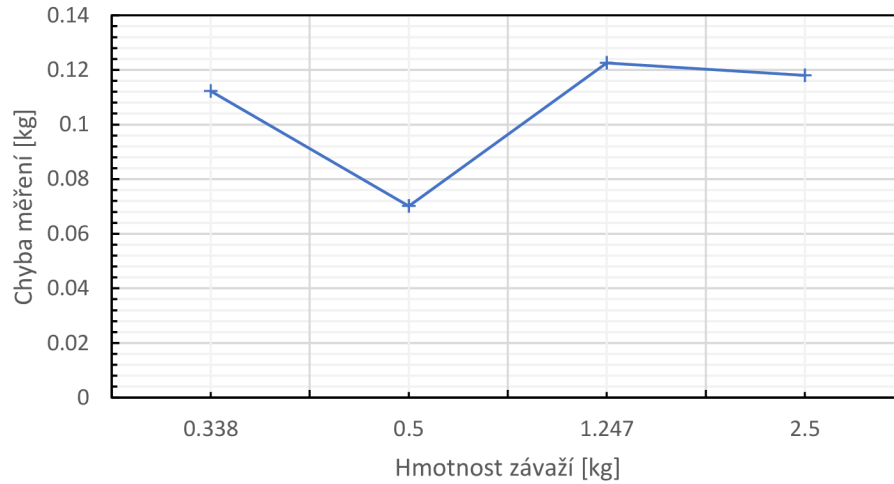
Z měření je zřejmé, že chyba měření hmotnosti závaží je lineárně závislá na hmotnosti zavěšeného závaží. Následující rovnice (6.1, 6.2, 6.3) popisují vztahy mezi jednotlivými veličinami a vzorec pro dopočítání skutečné hmotnosti závaží.

$$m_{ch}(m) = -0,0339 \cdot m + 0,1667 \quad (6.1)$$

$$m_{měř}(m) = m + m_{ch}(m) = m - 0,0339 \cdot m + 0,1667 \quad (6.2)$$

$$m = \frac{m_{měř} - 0,1667}{1 - 0,0339} \quad (6.3)$$

Graf 6.2 znázorňuje chybu měření hmotnosti závaží získané z rovnice 6.3 závislé na hmotnosti závaží zavěšeného na navijáku jednoosého HOBM. Chyba měření nemá již lineární klesající průběh, ale přibližně konstantní.



Obrázek 6.2: Chyba měření hmotnosti závaží po korekci chyby

b) Měření hmotnosti závaží metodou „UpDownMass“

Jestliže je závaží v klidovém stavu a nepohybuje se, je vyvíjen zátěžný moment na rotor motoru o velikosti odpovídající zavěšenému závaží na navijáku jednoosého HOBM a zmenšeného o protimoment způsobeným suchým třením ve vazbách. Tento protimoment působí vždy proti směru pohybu, čehož je využito v této metodě. Následující rovnice popisuje vztah mezi jednotlivými momenty.

$$M_r = M_z - M_T \quad (6.4)$$

Pro další kroky je využita předběžná hmotnost závaží, která není přesná, ale díky ní je docíleno klidového stavu. Poté se snižuje proud motorem, dokud se nezaznamená pohyb rotoru a změří se moment na rotoru. Toto je ekvivalentně provedeno i pro situaci, kdy se zvyšuje proud motorem. Následující rovnice (6.5, 6.6) popisují momenty na rotoru v těchto dvou stavech.

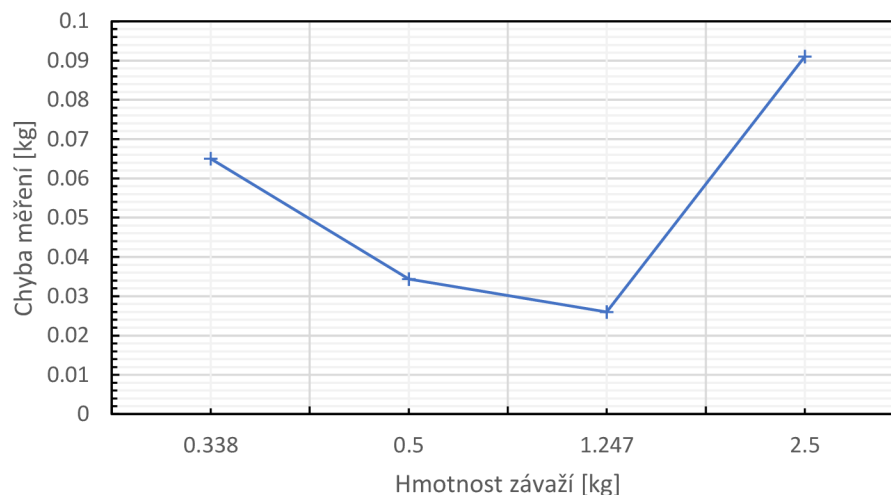
$$M_{r,up} = M_z + M_T \quad (6.5)$$

$$M_{r,down} = M_z - M_T \quad (6.6)$$

Nyní pro dosažení momentu způsobeného zavěšeným závažím se tyto dvě hodnoty zprůměrují.

$$M_v = \frac{M_{r,up} + M_{r,down}}{2} = \frac{M_z + M_T + M_z - M_T}{2} = M_z \quad (6.7)$$

Díky vypočítanému výslednému momentu je možno jednoduše dopočítat hmotnost závaží a provést měření.



Obrázek 6.3: Chyba měření hmotnosti závaží „UpDownMass“ metodou

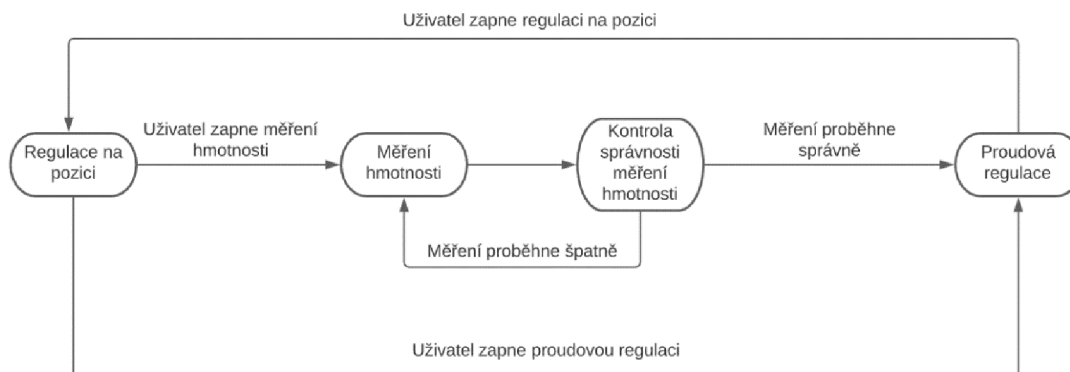
Jak je zřejmé z měření oběma metodami (Obrázek 6.2, Obrázek 6.3), je naměřená hmotnost závaží vždy zatížena chybou. Tato chyba nastává díky BLDC motoru, který je speciální konstrukcí stroje s permanentními magnety. Vinutí je napájené z měniče přibližně lichoběžníkovým průběhem proudu a při různých polohách rotoru v kombinaci s budícím tokem od permanentních magnetů není během jedné otáčky moment při stejném proudu konstantní. Takže měření hmotnosti závaží na hřídeli bude vždy zatíženo nějakou chybou v závislosti na poloze hřídele. Takové chyby se dají zredukovat měřením vždy ve stejné poloze rotoru. Další vliv na měření může mít i teplota vinutí motoru nebo nepřesně naměřené parametry motoru [18].

6.2.3 Proudová regulace

Když je hmotnost úspěšně změřená, může se přejít na samotné kompenzování váhy, které je realizováno proudovou regulací. Z měřené hmotnosti se dopočítá proud, který odpovídá momentu závaží zavěšeného na navijáku, od něj se pak odečte aktuální proud na motoru. Výsledkem rozdílu je odchylka, která vstupuje do PID bloku. PID blok určuje velikost regulačního zásahu, který je přiveden na motor jednoosého HOBM. Tímto je docíleno plynulého přesouvání závaží na navijáku za použití malé síly uživatele, avšak při měření hmotnosti může docházet k chybám měření, které ovlivní tuto regulaci (závaží začne bez dodání síly stoupat nebo klesat), proto bylo nutné ošetřit tento stav, a to vytvořeným blokem zvaným DeadZone, který zodpovídá za to, aby se regulace započala až při překročení hranice dodávané práce uživatelem.

6.2.4 Stavový automat

V předchozích částech byly uvedeny jednotlivé úkoly pro jednoosý HOBM, ale jen společně tvoří funkční algoritmus. Sjednocení těchto úkolů je zajištěno pomocí stavového automatu, který za určitých podmínek přepíná z jednoho stavu do druhého. Tímto způsobem je možno nejdříve zavěsit závaží na naviják, kdy se jedná o stav regulace na pozici, a poté uživatel může zapnout kompenzování váhy. Po tomto úkonu se stav přesune na měření hmotnosti závaží. Až je váha změřena, zapíná se proudová regulace.



Obrázek 6.4: Stavový automat jednoosého HOBM

7 Další vývoj

Další vývojové kroky pro vylepšení této práce jsou jak v konstrukční části, tak v softwarové. Jak již bylo zmíněno v rešeršní části, každý HOBM má určitý pracovní prostor, který je definován jednotlivými vazbami manipulátoru. Pokud manipulátor dojde na hranici pracovního prostoru, sepne se koncový spínač, a tak se předchází poškozením. Proto je vhodné přidat na skříň navijáku koncový spínač, který by se sepnul, pokud by do něj narazil efektor na konci lana.

Pro potvrzení, že je BLDC motor skutečně vhodným pohonem, by bylo vhodné určit momentovou charakteristiku BLDC motoru v závislosti na poloze rotoru, a tím ověřit, zdali je možno dosáhnout stejného momentu pro všechny polohy rotoru.

Zlepšení práce a interakce s uživatelem by mohlo být vyřešeno přidáním efektoru na konec lana navijáku. Tento efektor by měl obsahovat tlačítko, které by vypovídalo, jestli se uživatel chystá manipulovat se závažím nebo ne, a tím také docílit větší bezpečnosti.

Naviják je aktuálně vyroben pomocí 3D tisku, což pro maximální hmotnost zavěšeného závaží na navijáku není zcela vhodné. Opotřebení je vysoké a životnost nízká, proto by dalším krokem k vylepšení navijáku byla změna materiálu za pevnější a odolnější.

Dalším vylepšením by mohlo být vylepšení charakteristiky zatěžování jednoosého ručně ovládaného kompenzátoru váhy a to tak, aby se dalo jednoznačně určit, zdali zásah byl chtěný, nebo jestli se jednalo o náhodný impuls. Implementování této znalosti do algoritmu by vedlo k lepší manipulaci a bezpečnosti práce.

8 Závěr

V předchozím textu byla nejdříve vysvětlena historie HOBM, jednotlivé konstrukční provedení těchto strojů, konstrukce historických mechanických HOBM na principu pantografového mechanismu a vylepšené konstrukce o pružiny, které zajišťují kompenzaci váhy namísto protizávaží. Dále se práce zabývala hlavními senzory, které se používají ke konstruování průmyslově vyráběných HOBM a nejčastějšími pracovními módy, které může uživatel těchto strojů využít.

Hlavním cílem této práce bylo navržení konstrukce a řídicího algoritmu pro jednoosý HOBM. Toto však nejdříve bylo ověřeno simulací a vizualizací. Při návrhu tohoto zařízení byly vzaty základní myšlenky z rešeršní části. Jednou z nich bylo například zvolení vhodného pohonu.

Pro měření a řízení jednoosého HOBM bylo využito spojení softwaru Matlab-Simulink a karty MF624 od společnosti Humusoft. Využití tohoto softwaru se ukázalo jako vhodné pro danou aplikaci, díky jednoduchému programovacímu prostředí a možnostem řešení diferenciálních rovnic. Také je nutno zmínit, že tento software poskytuje knihovny pro snadnější zpracování vizualizace.

Při měření hmotností závaží se objevila chyba měření, která nezávisela na velikosti hmotnosti závaží ani parametrech motoru z datasheetu. Domnělým důvodem této chyby je konstrukce BLDC motoru.

Po zhodnocení získaných informací o HOBM a výsledku této práce lze usuzovat, že se jedná o funkční prototyp jednoosého HOBM, který však vyžaduje další úpravy pro preciznější měření váhy a zlepšení konstrukce. Jako laboratorní model je vhodný pro ukázky závislosti odebíraného proudu na zatížení hřídele motoru, a také pro demonstraci dvou přístupů měření váhy na hřídeli motoru.

Použité informační zdroje

- [1] ARAKELIAN, Vigen. The history of the creation and development of hand-operated balanced manipulators (HOBM). In: *International Symposium on History of Machines and Mechanisms*. Springer, Dordrecht, 2004. p. 347-356.
- [2] ZHANG, Yang. *Design and synthesis of mechanical systems with coupled units*. 2019. PhD Thesis. Rennes, INSA.
- [3] Manipulator with electronic control. In: *Direct Industry* [online]. Direct Industry, © 2021. [cit. 2021-01-10]. Dostupné z: <https://www.directindustry.com/prod/scaglia-indeva/product-5527-757619.html>
- [4] Pneumatic manipulator. In: *Direct Industry* [online]. [cit. 2021-01-10]. Direct Industry, © 2021. [cit. 2021-01-11]. Dostupné z: <https://www.directindustry.com/prod/dalmec/product-13956-1885886.html>
- [5] EC 45 Ø45 mm, brushless, 150 Watt, with Hall sensors. In: *Maxon* [online]. Maxon, © 2021. [cit. 2021-01-12]. Dostupné z: https://www.maxongroup.com/maxon/view/product/motor/ecmotor/ec/ec45/136196?etcc_cu=onsite&etcc_med=Header%20Suche&etcc_cmp=mit%20Ergebnis&etcc_ctv=Layer&query=EC%20150
- [6] ESCON 50/5. In: *Maxon* [online]. Maxon, © 2021. [cit. 2021-01-10]. Dostupné z: <https://www.maxongroup.com/maxon/view/product/control/4-Q-Servokontroller/409510>
- [7] *MF624 - PCI Multifunkční vstupně-výstupní karta*. [online]. Humusoft. [cit. 2021-01-15]. Dostupné z: <https://www.humusoft.cz/datacq/mf624/>
- [8] *MATLAB* [online]. MathWorks. [cit. 2021-01-10]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>
- [9] *Simscape Model and simulate multidomain physical systems*. [online]. MathWorks. [cit. 2021-01-18]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/products/simscape.html>
- [10] *Laboratorní zdroj NTP-5531*. [online]. Manson. [cit. 10.1.2021]. Dostupné z: <https://www.manson.com.hk/product/ntp-5531/>
- [11] INDEVA. AUTO WEIGHT-SENSE AND AUTO BALANCING INTELLIGENT LIFT ASSIST DEVICE [video]. *Youtube* [online]. INDEVA, 2021. [cit. 2021-01-18]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=OtpCSHABnwU>

- [12] Direct Industry. Electric manipulator. [video]. *Direct Industry* [online]. Direct Industry, © 2021. [cit. 2021-01-20]. Dostupné z: <https://www.directindustry.com/prod/famatec/product-15969-1807799.html>
- [13] GIVENS, Raymond David. *Pneumatic multi-weight balancing device*. U.S. Patent No 8,105,008, 2012.
- [14] INDEVA. Liftronic Easy- INDEVA [video]. *Youtube* [online]. INDEVA, 2012. [cit. 2021-01-10]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=110k-TVRTmk>
- [15] INDEVA. Liftronic Air INDEVA, intelligent lifting systém [video]. *Youtube* [online]. INDEVA, 2012. [cit. 2021-01-10]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=8vwyw0KFMWw>
- [16] Electric Manipulators. In: *ONE STOP HANDLING* [online]. ONE STOP HANDLING LTD, © 2021 [cit. 2021-01-10]. Dostupné z: <https://www.onestophandling.ie/products/manipulators/electric-manipulators/>
- [17] ZHANG, Yang, et al. Key Features of the Coupled Hand-operated Balanced Manipulator (HOBM) and Lightweight Robot (LWR). In: *IFTToMM World Congress on Mechanism and Machine Science*. Springer, Cham, 2019. p. 2289-2298.
- [18] ONDRŮŠEK, Čestmír. Dotaz na BLDC motor – BP. In: *Outlook* [online]. 14 April 2021. [cit. 2021-04-28]. Dostupné ze soukromé konverzace.

Seznam symbolů

R_a	$[\Omega]$	Odpor vinutí statoru
L_a	$[H]$	Indukčnost vinutí statoru
$i(t)$	$[A]$	Proud tekoucí statorovým vinutím
$u(t)$	$[V]$	Napětí zdroje
$u_i(t)$	$[V]$	Indukované napětí na motoru
$\omega(t)$	$[rad \cdot s^{-1}]$	Úhlová rychlost rotoru
$C\Phi$	$[Nm/A]$	Momentová konstanta motoru
J_k	$[m^2kg]$	Moment setrvačnosti kotvy
J_p	$[m^2kg]$	Moment setrvačnosti převodovky
J_n	$[m^2kg]$	Moment setrvačnosti navijáku
J_c	$[m^2kg]$	Celkový moment setrvačnosti jednoosého HOBM
i_p	$[-]$	Převodový poměr převodovky
B_k	$[Nms]$	Tlumení kotvy
B_p	$[Nms]$	Tlumení převodovky
B_c	$[Nms]$	Celkové tlumení jednoosého HOBM
r	$[mm]$	Poloměr navijáku
g	$[ms^{-2}]$	Poloměr navijáku
m	$[kg]$	Hmotnost zavěšeného závaží
$M(t)$	$[Nm]$	Moment na rotoru
$M_r, M_0(t)$	$[Nm]$	Moment na rotoru způsobený zátěží
E_k	$[J]$	Kinetická energie
E_D	$[J]$	Disipační energie
E_p	$[J]$	Potencionální energie
W	$[W]$	Výkon
A	$[J]$	Práce
q_i	$[rad]$	Úhlová poloha
m_{ch}	$[kg]$	Spojnice trendu chyby měření hmotnosti
$m_{měř}$	$[kg]$	Naměřená hmotnost
M_z	$[Nm]$	Moment od zátěže
M_T	$[Nm]$	Protimoment způsobený třením ve vazbách
$M_{r,up}$	$[Nm]$	Moment na rotoru, kdy působí ve stejném směru jak moment od závaží, tak i protimoment způsobený třením.
$M_{r,down}$	$[Nm]$	Moment na rotoru, kdy působí v opačném směru protimoment způsobený třením (na rozdíl od momentu způsobený závažím).
M_v	$[Nm]$	Výsledný moment na rotoru

Seznam zkratek

HOBM	Hand-Operated Balanced Manipulator
BLDC	Bezkartáčový stejnosměrný motor
DIR	Direction
EN	Enable
PID	Proporcionální, Integrovní, Derivační
GND	Zem
VUT	Vysoké učení technické
LWR	Light Weight Robot

Seznam obrázků

Obrázek 1.1: Příklad ručně ovládaného kompenzátoru váhy [1].....	9
Obrázek 3.1: Schéma pantografového mechanismu	7
Obrázek 3.2: Pružinový HOBM [1].....	8
Obrázek 3.3: Ukázka HOBM s elektrickým pohonem [3]	9
Obrázek 3.4: Ukázka HOBM s pneumatickým pohonem [4].....	9
Obrázek 4.1: Elektronické schéma BLDC motoru	11
Obrázek 4.2: Mechanické schéma jednoosého HOBM	11
Obrázek 4.3: Měření hmotnosti závaží při konstantní pozici rotoru.	15
Obrázek 4.4: Porovnání měření hmotnosti závaží při změně polohy rotoru	16
Obrázek 4.5: Porovnání způsobů měření hmotnosti závaží.....	16
Obrázek 4.6: Vizualizace jednoosého HOBM.....	17
Obrázek 5.1: Motor EC 45 Ø45 mm, bezkartáčový, 150 Watt s číslem 36198, [5]	18
Obrázek 5.2: Prototypy navijáků od prvního k finálnímu modelu	19
Obrázek 6.1: Chyba měření hmotnosti závaží a její trend	23
Obrázek 6.2: Chyba měření hmotnosti závaží po korekci chyby	24
Obrázek 6.3: Chyba měření hmotnosti závaží „UpDownMass“ metodou	25
Obrázek 6.4: Stavový automat jednoosého HOBM.....	26

Seznam tabulek

Tabulka 5.1: Propojení mezi Humusoft Kartou MF624 a ESCON 50/5	20
Tabulka 5.2: Propojení mezi kartou Humusoft MF624 a enkodérem motoru	21
Tabulka 5.3: Propojení mezi motorem a ESCON 50/5	21
Tabulka 5.4: Propojení mezi zdrojem a ESCON 50/5	21

Seznam příloh

Elektronické přílohy

- 3D součástky
- Simulace jednoosého HOBM
- Program jednoosého HOBM