



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

LETECKÝ ÚSTAV

INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

JOYSTICK S MĚNITELNOU SILOU V ŘÍZENÍ

JOYSTICK WITH VARIABLE FORCE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Dan Peťovský

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Pavel Zikmund, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání bakalářské práce

Ústav: Letecký ústav
Student: Dan Peřovský
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: Ing. Pavel Zikmund, Ph.D.
Akademický rok: 2019/20

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:

Joystick s měnitelnou silou v řízení

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Joysticky pro letecké simulátory zpravidla postrádají zpětnou vazbu ve formě síly v řízení. Průběh sil v závislosti na výchylkách a rychlosti letu navíc moc neodpovídá průběhu sil u skutečných letounů. Na trhu je sice několik výrobců nabízejících joystick s funkcí „Force–feedback“, které ale nemají moc věrné zprostředkování sil. Proto bude práce zaměřena na rozbor sil v řízení letounu a návrh mechanismu pro joystick, který bude simulovat síly v řízení letounu.

Cíle bakalářské práce:

- Rozbor sil v ručním řízení letounu.
- Návrh mechanismu, který dokáže upravovat síly v řízení joysticku na základě informací o letu z leteckého simulátoru.

Seznam doporučené literatury:

DANĚK, Vladimír. Mechanika letu: Letové vlastnosti. II. Akademické nakladatelství CERM, 2011.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jaroslav Juračka, Ph.D.
ředitel ústavu

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

Abstrakt

Tato práce se zabývá návrhem mechanismu joysticku, který umožňuje silovou zpětnou vazbu. První část obsahuje popis sil v ručním řízení letounu a popis několika používaných mechanismů u joysticků s funkcí force feedback. Druhá část obsahuje návrh mechanismu a poznatky při kompletaci prototypu.

Abstract

This thesis deals with the design of joystick mechanism with force feedback function. The first part contains description of forces in the control of aircraft and description of the mechanisms used for the joysticks with force feedback function. The second part contains the design of the mechanism and knowledge in completing the prototype.

Klíčová slova

Joystick, síly v řízení, force feedback, letecký simulátor

Keywords

Joystick, control forces, force feedback, flight simulator

Bibliografická citace

PEŤOVSKÝ, Dan. *Joystick s měnitelnou silou v řízení* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-20]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/125142>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Letecký ústav. Vedoucí práce Pavel Zikmund.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Joystick s měnitelnou silou v řízení“ vypracoval samostatně s použitím pramenů a odborné literatury uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Dan Peťovský

Poděkování

Tímto děkuji vedoucímu mé práce Ing. Pavlu Zikmundovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné připomínky a zejména za podporu při kompletaci prototypu.

Obsah

1.	Úvod.....	12
2.	Teoretická část.....	13
2.1	Rozbor sil v řízení letounu.....	13
2.1.1	Síla na řididle klopení.....	13
2.1.2	Síla na řididle klonění.....	15
2.1.3	Síla na řididle zatáčení.....	16
2.2	Joysticky s funkcí force feedback.....	17
3.	Návrh mechanismu.....	20
3.1	Volba parametrů	20
3.2	Výběr konceptu.....	21
3.3	Elektronika.....	21
3.4	Konstrukce mechanismu.....	22
3.5	Volba motorů.....	24
3.6	Návrh převodu	25
3.7	Upevnění konstrukce	27
4.	Zkoušení mechanismu	28
5.	Závěr	30
	Seznam použitých zdrojů	31
	Seznam použitých symbolů a značek	32
	Seznam obrázků a tabulek	34
	Přílohy	35

1. Úvod

Většina běžných joysticků pro simulátory, které se v současnosti vyskytují na trhu, poskytují uživateli silovou zpětnou vazbu pomocí pružin. Takové řešení neumožňuje řídit odezvu podle dat ze simulátoru a průběh sil v závislosti na poloze páky neodpovídá skutečnosti.

Proto se tato práce zabývá návrhem mechanismu joysticku, který umožňuje řídit síly. Průběh konstrukce je popsán od teoretické části, kde se zabývám rozбором sil v řízení u skutečného letounu a popisem existujících řešení, přes část konstrukční až po testování prototypu.

Výsledkem této práce je tedy především funkční prototyp mechanismu joysticku, který umožňuje silovou zpětnou vazbu na základě dat z leteckého simulátoru.

Elektronika je v práci navržena jen v míře potřebné pro konstrukci a nebude zde uvedena detailně.

2. Teoretická část

2.1 Rozbor sil v řízení letounu

K řízení klasického letounu se standardně používají 3 primární orgány řízení, které umožňují ovládání třech rotačních pohybů. Jsou to křídélka (řízení klonění), výškové kormidlo (řízení klopení) a směrové kormidlo (řízení zatáčení). Pilot k ovládání těchto orgánů používá řídicí páky nebo řídicí volant pro ovládání křidélek a výškového kormidla. Pro ovládání směrového kormidla slouží nožní pedály [1].

Řídicí síly jsou důležitým parametrem, protože přímo ovlivňují schopnost pilota ovládat letoun. Lze je definovat jako síly, které musí pilot vyvinout na řídicí páky k překonání aerodynamických účinků na kormidlo. Maximální hodnoty jsou uvedeny v certifikačních specifikacích [1].

2.1.1 Síla na řídidle klopení

Pro řídicí sílu na řídidle klopení v závislosti na rychlosti letu, pro rovnovážný nevyvážený přímočarý režim letu, lze odvodit následující vztah [1]:

$$F_v = F_0 + F_1 \frac{1}{2} \rho V^2$$

Koeficienty:

$$F_0 = K_V k_{VOP} S_V c_V \left(\frac{G}{S} \right) \frac{C_{L\alpha} C_{H\delta}}{C_{L\alpha} C_{m\delta}^*} (\bar{x}_T - \bar{x}'_A)$$

$$F_1 = -K_V k_{VOP} S_V c_V (C_{H0} - C_{m0} \frac{C_{L\alpha} C_{H\delta}}{C_{L\alpha} C_{m\delta}^*})$$

Kde: ρ – hustota vzduchu

V – rychlost letu letadla

K_V – převod řízení

k_{VOP} – koeficient snížení kinetického tlaku

S_V – plocha obou polovin výškového kormidla za osou otáčení

c_V – střední hloubka kormidla za osou otáčení

G – tíhová síla letounu

S – vztažná plocha křídel

\bar{x}_T – poloha těžiště letounu

\bar{x}'_A – poloha aerodynamického středu letounu s volným řízením

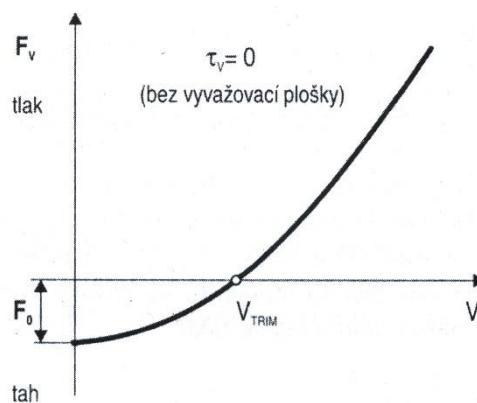
$C'_{L\alpha}$ – sklon vztahové čáry letounu s volným řízením

$C_{H\delta}$ – součinitel závěsového momentu výškového kormidla

$C_{L\alpha}$ – sklon vztahové čáry letounu s pevným řízením

$C_{m\delta}^*$ – součinitel klopivého momentu k aerodynamickému středu letounu s pevným řízením podle výchylky výškového kormidla

Typický průběh této síly v závislosti na rychlosti letu ukazuje graf v obrázku 2.1. Maximální hodnoty se liší podle typu řízení. Například hodnoty podle specifikace CS-23 jsou uvedené v tabulce 2.1.



Obr. 2.1 Průběh síly na řídicí klopení v závislosti na rychlosti letu [1]

Tab. 2.1 CS-23 maximální síly pro ovládání výškového kormidla [1]

	Krátkodobě	Dlouhodobě
Řídicí pákou	267 N	45 N
Řídicím volantem – obě ruce	334 N	45 N
Řídicím volantem – jednou rukou	222 N	45 N

Mezi důležitý parametr pro posouzení podélné obratnosti letounu patří i síla na násobek. Jedná se o přírůstek řídicí síly potřebný ke změně násobku zatížení oproti ustálenému letu o hodnotu jedna. Lze odvodit vztah [1]:

$$\frac{\Delta F_V}{n-1} = K_V k_{VOP} S_V c_V \left(\frac{G}{S}\right) \frac{C_{L\alpha} C_{H\delta}}{C_{L\alpha} C_{m\delta}^*} (\bar{x}_T - \bar{x}'_D)$$

Kde: \bar{x}'_D – poměrná poloha dynamického bodu letounu

Můžeme tak vyjádřit sílu dynamicky na násobku zatížení v průběhu manévru.

2.1.2 Síla na řídidle klonění

V závislosti na úhlu vybočení můžeme pro řídicí sílu křidélek získat tento vztah [1]:

$$F_K = 2K_K S_K c_K \left(\frac{1}{2} \rho V^2\right) \frac{C_{H\delta K}}{C_{l\delta K}} \left(C_{l\beta} - C_{l\delta S} \frac{C_{n\beta}}{C_{n\delta S}}\right) \beta$$

Kde: K_K – převod řízení

S_K – plocha křídélka za osou otáčení

c_K – střední hloubka křídélka za osou otáčení

$C_{H\delta K}$ – součinitel závěsového momentu podle výchylky křídélka

$C_{l\delta K}$ – součinitel klonivého momentu podle výchylky křídélka

$C_{l\beta}$ – součinitel klonivého momentu

$C_{l\delta S}$ – součinitel klonivého momentu podle úhlu náběhu SOP

$C_{n\beta}$ – součinitel zatáčivého momentu

$C_{n\delta S}$ – součinitel zatáčivého momentu podle úhlu náběhu SOP

β – úhel vybočení letounu

Maximální síly dle CS-23 jsou uvedeny v tabulce 2.2.

Tab. 2.2 CS-23 maximální síly pro ovládání křidélek [1]

	Krátkodobě	Dlouhodobě
Řídicí pákou	133 N	23 N
Řídicím volantem – obě ruce	222 N	23 N
Řídicím volantem – jednou	111 N	23 N

2.1.3 Síla na řididle zatáčení

Řídicí sílu na nožním pedálu lze popsat následujícím vztahem [1]:

$$F_S = -K_S S_S c_S k_{SOP} \left[C_{H\beta SOP} \left(1 - \frac{\partial \sigma}{\partial \beta} \right) - C_{H\delta S} \frac{C_{n\beta}}{C_{n\delta S}} \right] \frac{1}{2} \rho V^2$$

Kde: K_S – převod řízení

S_S – plocha směrového kormidla za osou otáčení

c_S – střední hloubka kormidla za osou otáčení

k_{SOP} – koeficient snížení kinetického tlaku

$C_{H\beta SOP}$ – součinitel závěsového momentu podle úhlu náběhu SOP

σ – horizontální úhel zešikmení proudu v místě SOP

$C_{H\delta S}$ – součinitel závěsového momentu podle výchylky směrového kormidla

Maximální síla na nožních pedálech dle CS-23 je znázorněna v tabulce 2.3.

Tab. 2.3 CS-23 maximální síla na nožních pedálech [1]

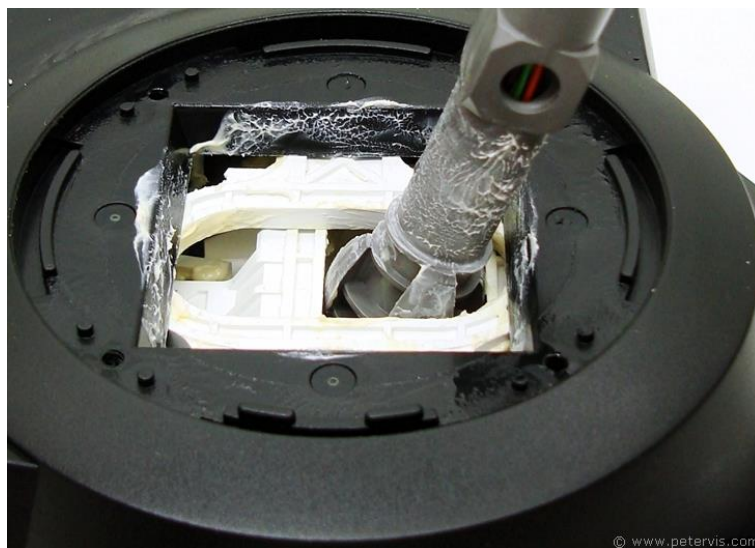
	Krátkodobě	Dlouhodobě
Nožním pedálem	667 N	89 N

Všechny tyto 3 síly závisí na konstrukci letounu a několika dynamických parametrech. Mezi nejdůležitější patří rychlost letu, ale síly si mění i v závislosti na násobku zatížení, když je prováděn manévr. Maximální síly na jednotlivých orgánech řízení se od sebe liší, což je způsobeno také omezením člověka, který není schopný působit stejně velkou silou v různých směrech. Proto se podle předpisů největší povolená síla na pedálech a na řídicí páce liší – záleží, jestli působí ve směru k tělu (řízení výškového kormidla) nebo do stran (řízení křídélek).

2.2 Joysticky s funkcí force feedback

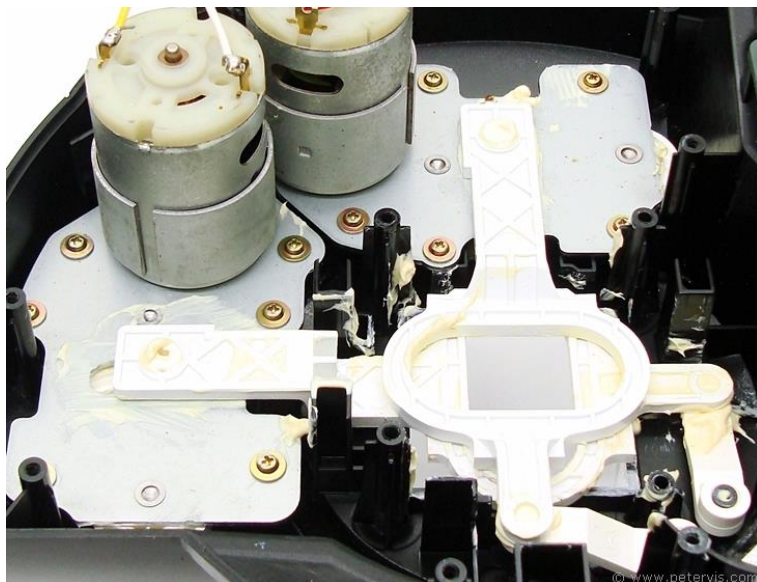
Force feedback je jednou z metod k zprostředkování zpětné vazby. Používá se často u videoher a simulátorů. Nejčastěji se vyskytuje u herních volantů, kde simuluje silové poměry v řízení skutečného vozu. K tomu nejčastěji využívá motorů [2].

Joysticky se silovou zpětnou vazbou se v dnešní době na trhu běžně nevyskytují. Mezi poslední známější joysticky této kategorie patřily výrobky společnosti Microsoft řady Sidewinder Force Feedback joystick. První (1997) a druhou (1998) generaci dělí od sebe jeden rok a liší se použitým mechanismem [3].



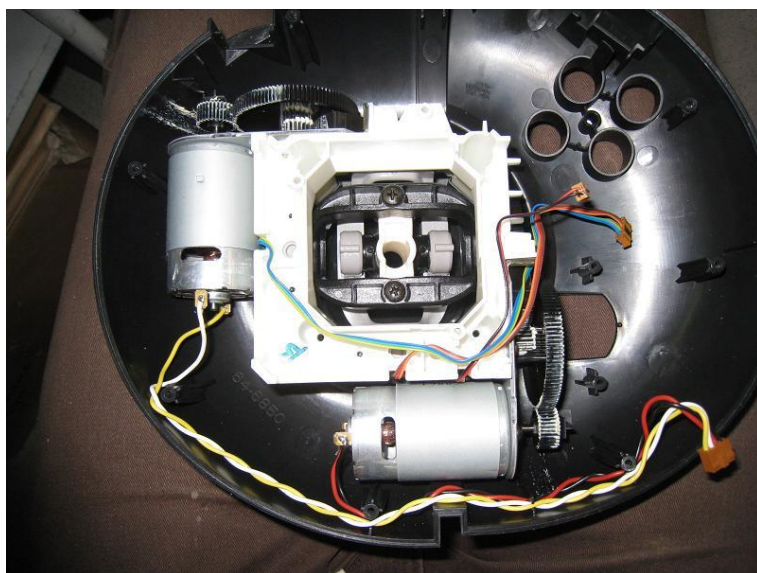
Obr. 2.2 Horní část mechanismu Sidewinder Force Feedback Pro joysticku [4]

U prvního typu je zpětná vazba provedena pomocí dvou čtyřkloubových mechanismů, jednoho pro každou osu. K pohonu těchto mechanismů je použito dvou stejnosměrných motorů s převodovkou.



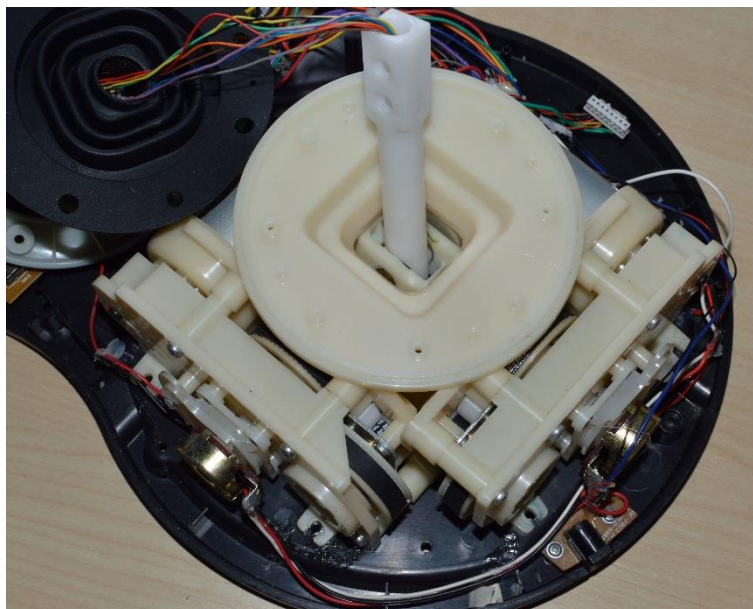
Obr. 2.3 Pohled na mechanismus Sidewinder FF Pro joysticku [4]

Druhý typ používá odlišný mechanismus podobající se těm používaných u herních ovladačů. Dvě hřídele dovolují ovládat oba stupně volnosti páky, aniž by se navzájem ovlivňovaly.



Obr. 2.4 Mechanismus joysticku Sidewinder FF 2 [5]

Poslední joystick s funkcí force feedback, který tady zmíním, pochází od firmy Guillemot. Využívá mechanismus obdobný předchozímu popsanému joysticku, rozdílné je však použití převodovky se synchronními řemeny místo ozubených kol.



Obr. 2.5 Mechanismus force feedback joysticku výrobce Guillemot

3. Návrh mechanismu

3.1 Volba parametrů

Před začátkem návrhu mechanismu bylo potřeba si stanovit základní konstrukční parametry. Za nejdůležitější považuji maximální sílu odezvy, výchylky páky a délku páky. Z těchto parametrů je možné vycházet pro základní pevnostní výpočty a ke stanovení základní geometrie součástí.

Maximální síla požadovaná od mechanismu byla po konzultaci s vedoucím práce stanovena na 50 N. Jedná se o odhad a v závěru práce bude zkoušeno, jestli je tato volba vhodná. Maximální výchylka páky byla podle běžných stolních joysticků zvolna na 25° (od středové po krajní polohu) pro oba směry. Délka páky (od osy otáčení po dlaň na páce) bude 140 mm. Jedná se opět o přibližnou hodnotu používanou u běžných joysticků.

K výrobě hlavních částí prototypu jsem se rozhodl využít 3D tisku. Hlavním důvodem je rychlá výroba modelu, dostupnost a v případě zjištění problémů na prototypu možnost rychlé výroby opraveného dílu. Největším omezením je nemožnost provést jednoduchý přesný pevnostní výpočet, proto výpočty budou jen orientační a s návrhovým koeficientem $k_n = 2$. Materiál pro výrobu většiny hlavních dílů volím PETG, kde se mez kluzu pohybuje okolo 50 MPa [6]. Tento materiál volím z důvodu snadného tisku a dobré houževnatosti. Některé díly budou vyrobeny z PLA pro vyšší tuhost.

Tab. 3.1 Přehled základních parametrů

Parametr	Označení	Hodnota
Maximální síla na páce	F_p	50 N
Maximální výchylka páky	–	25°
Délka páky	l_p	140 mm
Návrhový koeficient	k_n	2
Mez kluzu materiálu	σ_k	50 MPa
Dovolené normálové napětí	σ_{dov}	$= \frac{\sigma_k}{k_n} = \frac{50 \text{ MPa}}{2} = 25 \text{ MPa}$
Dovolené tečné napětí	τ_{dov}	$= \frac{\sigma_{dov}}{2} = \frac{25 \text{ MPa}}{2} = 12,5 \text{ MPa}$

3.2 Výběr konceptu

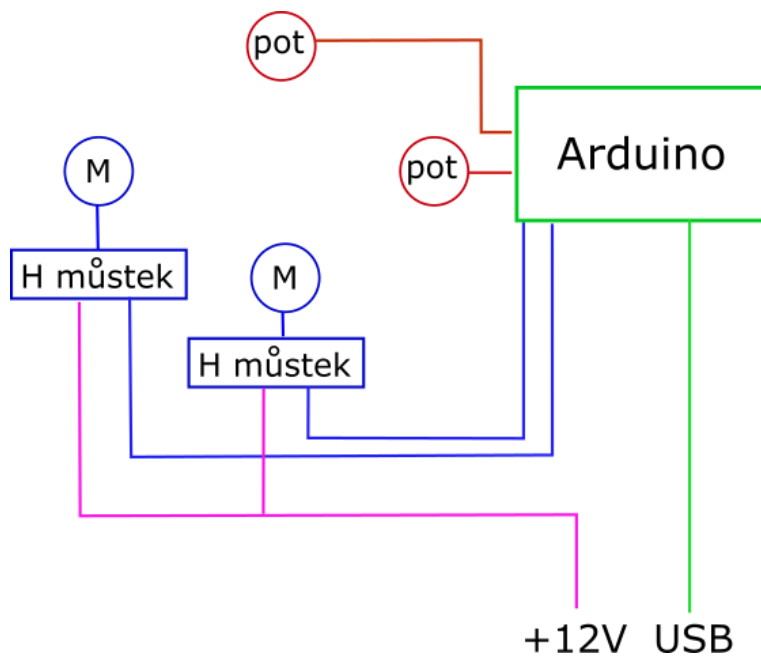
Pro zprostředkování sil se jeví jako vhodné použití stejnosměrných motorů, které se používají i u herních volantů. Jednou z výhod je jednoduché řízení ve velkém rozsahu otáček. Jako vhodnější koncept se zdá konstrukce s použitím hřídel s tvarovou částí. Lze tak využít běžných převodových součástí, jako jsou řemenice nebo ozubená kola. U varianty s kloubovým mechanismem by byl komplikovanější převod z motoru na páku.



Obr. 3.1 Demonstrátor konceptu

3.3 Elektronika

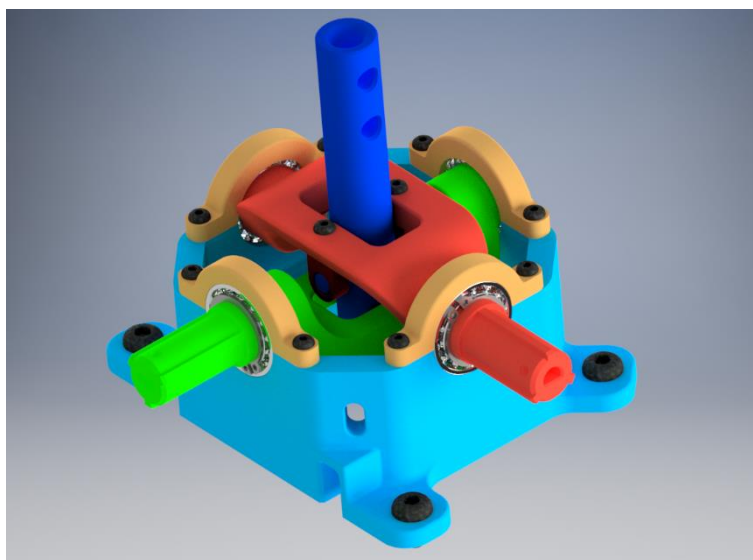
Joystick je primárně navrhován pro funkci se simulátorem X-Plane 11. Ten je dostupný na Leteckém ústavu a dokáže exportovat celou řadu dat, které lze využít při tvorbě různých vlastních periferií. Umožňuje tedy exportovat i údaje o silách na řididle. Tyto údaje budou následně zpracovány pomocí malého počítače (Arduino), jenž bude řídit motory a posílat informace o výchylkách řididla zpět do počítače. K získání informací o poloze páky bude využito klasických potenciometrů.



Obr 3.2 Zjednodušené schéma zapojení elektroniky

3.4 Konstrukce mechanismu

Základní části celého joysticku jsou hřídele a jejich uložení. Při konstrukci je možno využít dvou totožných hřídelí. Čepy, připevněné k jedné z hřídelí, zajišťují páku proti vysunutí. Páka zároveň obsahuje otvory, do kterých zapadají čepy na rukojeti, ta se pak skládá ze dvou sešroubovaných částí. K uložení hřídelí jsem se rozhodl použít kuličkových ložisek.



Obr. 3.3 Model mechanismu

Jako základní rozměr, pro určení geometrie hřídele, využiji průměr pod ložiskem. Máme zvolenou délku páky a požadovanou sílu, proto můžeme vypočítat kroutící moment M_k , kterým je toto místo namáhané.

$$M_k = F_p \cdot l_p = 50N \cdot 0,14m = 7Nm$$

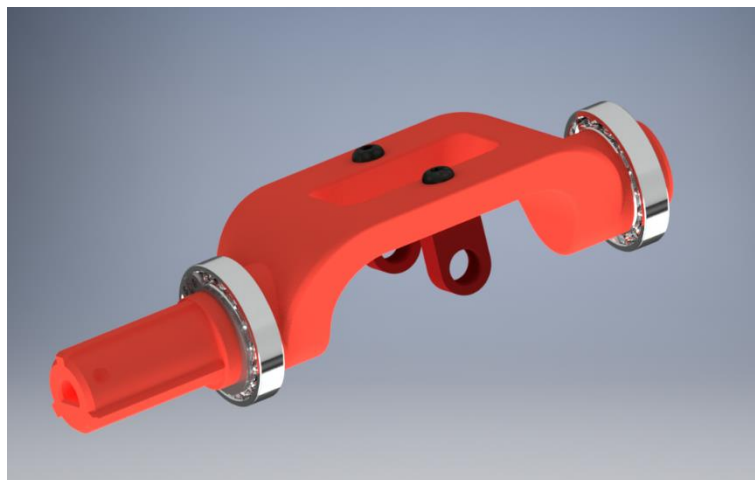
Následně lze dopočítat minimální průměr.

$$d_m = \sqrt[3]{\frac{16 \cdot M_h}{\pi \cdot \tau_{dov}}} = 14,2 \text{ mm}$$

Průměr, který odpovídá standardnímu vnitřnímu průměru ložisek, volím 17 mm. Jedná se o základní rozměr, ze kterého lze vyvodit zbylé rozměry hřídele.

Ložiska volím 61803 kvůli malému rozměru. Ve své poloze na hřídeli jsou zajištěny hřídelovými kroužky.

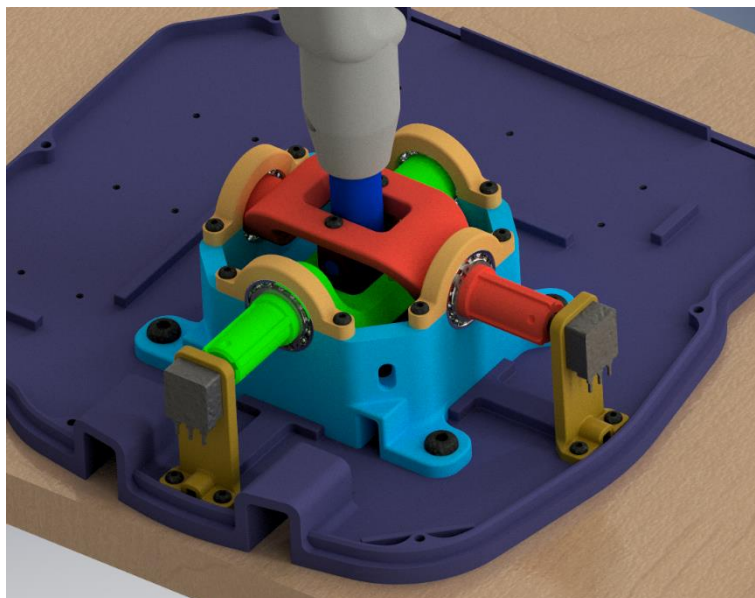
Volný konec následně obsahuje drážky pro připevnění převodu a otvor pro připojení potenciometru. Ten je nasazen z čela a připevněn k základní desce pomocí držáku.



Obr. 3.4 Sestava jedné hřídele

Sestava hřídelí s ložisky je pak následně připevněna ke stojanu. Uložení ložisek je dělené a spojené šrouby. Proti axiálnímu pohybu obsahuje uložení osazení. Celá tato konstrukce je šrouby připevněna k základní desce.

Výkres sestavy celého mechanismu se nachází v příloze této práce.



Obr. 3.5 Mechanismus na základní desce

3.5 Volba motorů

K zjednodušení konstrukce jsem se rozhodl použít přímo kombinaci motoru a převodovky. Kvůli zástavbovým možnostem bylo ale potřeba počítat ještě s dodatečným převodem k hřídelím s odhadovaným převodovým převodem $i = 3-4$. Výstupní kroutící moment z převodovky motoru M_m lze tedy určit takto:

$$M_m = \frac{M_k}{i} = 2,3 - 1,75 \text{ Nm}$$

Jako vhodný se zdál stejnosměrný motor série PG420 s planetovou převodovkou s převodem 1:49, který dokáže dodávat trvale kroutící moment $M_{\text{mot}} = 1,76 \text{ Nm}$ [7].



Obr. 3.6 Motor PG420 s převodovkou [7]

3.6 Návrh převodu

Vzhledem k rozměrům motoru bylo potřeba zvolit převod, který dokáže překonat větší vzdálenost. Dalšími požadavky byly menší rozměry a malý nebo žádný prokluz. Proto byl zvolen převod synchronním řemenem.

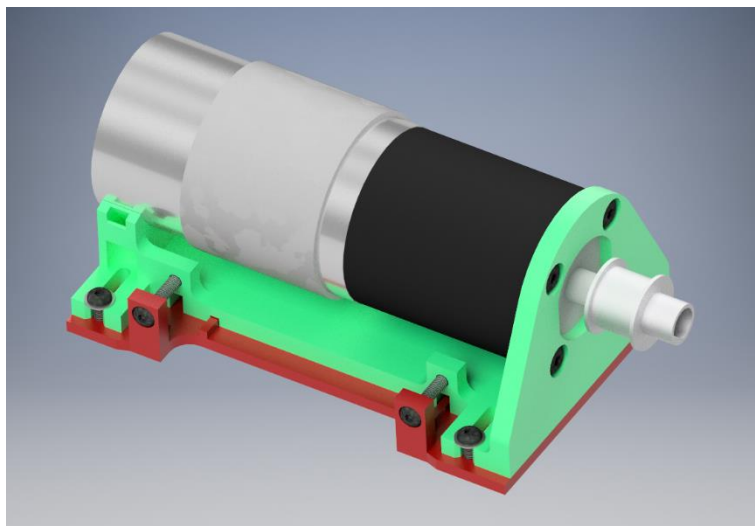
Po několik iteracích ve výpočetním programu jsem zvolil řemen HTD 3M se 106 zuby a šířce 9 mm, hnací řemenici s 16 zuby a hnanou s 60 zuby. Konečný převodový poměr i_r vychází tedy:

$$i_r = \frac{z_2}{z_1} = 3,75$$

$$M_r = M_{mot} \cdot i_r = 6,6 \text{ Nm}$$

Konečný krouticí moment vychází menší než požadovaný. Vzhledem k tomu, že rozdíl není velký a motor je schopen krátkodobě dodat i vyšší krouticí moment, lze jej považovat za dostačující.

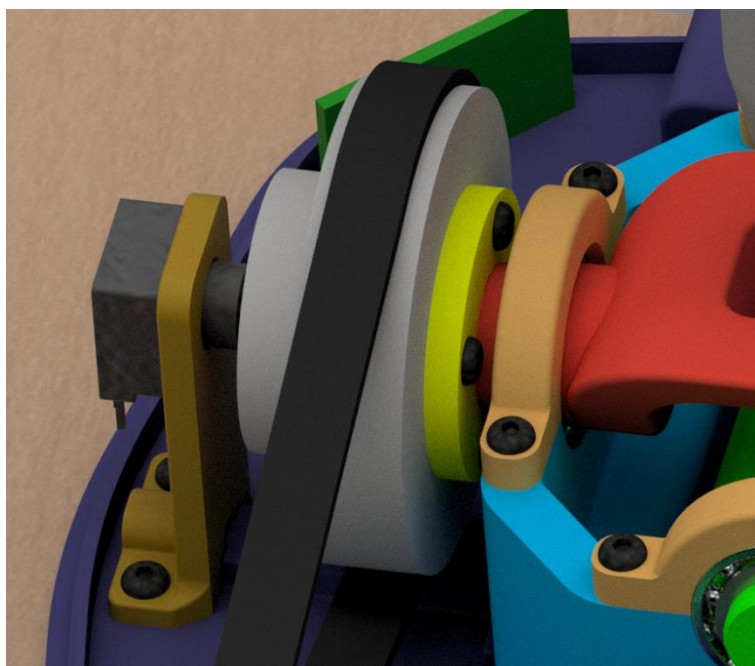
Motor je k držáku připevněn pomocí 4 šroubů na čele. K vůli jeho hmotnosti a možnosti dalšího pohybu je motor v zadní části ještě podepřen. Dodatečné napínání řemenu je provedeno pomocí posouvání držáku i s motorem. Držák může být posunut pomocí dvou šroubů, aby se dosáhlo požadovaného napnutí řemene. Celá konstrukce se pak pevně přišroubuje k základní desce.



Obr. 3.7 Uložení motoru na napínacím mechanismu

Řemenice u motoru má tvarový otvor pro přenos kroutícího momentu a proti axiálnímu posunutí je zajištěna pomocí stavěcího šroubu.

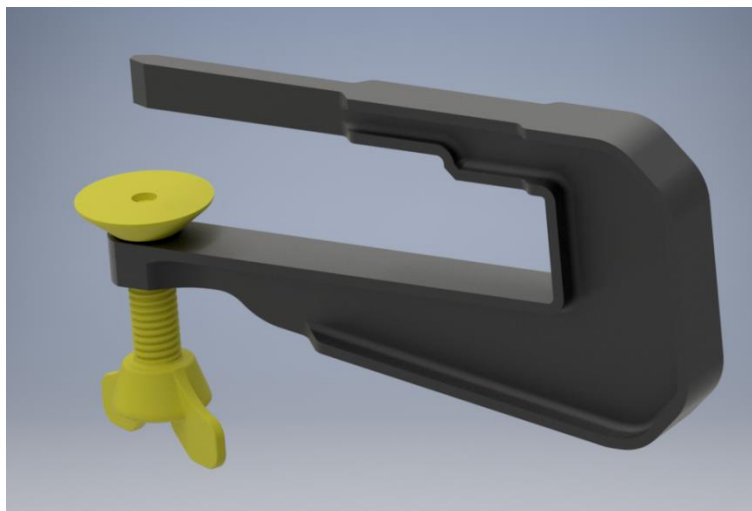
Pro upevnění velké řemenice je použito vlastního náboje, k němuž je přišroubovaná. Náboj pak obsahuje drážkování pro připevnění na hřídeli a je zajištěn stavěcím šroubem.



Obr. 3.8 Uložení hnané řemenice v mechanismu

3.7 Upevnění konstrukce

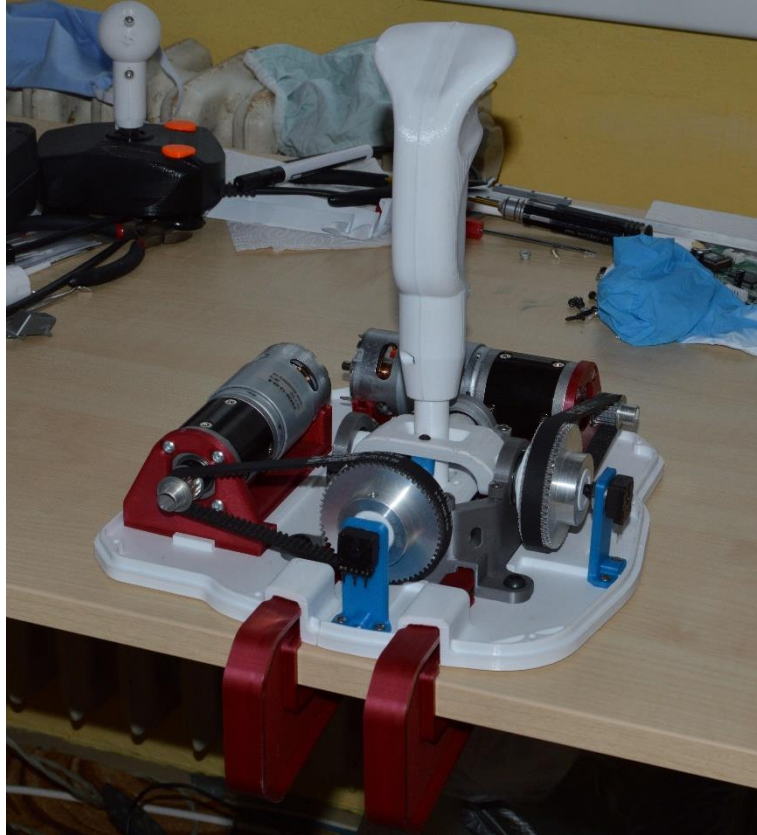
Vzhledem k poměrně vysoké síle bylo potřeba se zamyslet i nad upevněním joysticku, aby nedocházelo k jeho pohybu po podložce. Mimo pryžové podložky jsem se rozhodl pro zajištění polohy použít páky, které se do joysticku zasouvají zepředu a následně jej pomocí šroubů přitáhnou ke stolu. To by v kombinaci s hmotností joysticku mělo stačit k zajištění jeho polohy.



Obr. 3.9 Páka k upevnění konstrukce

4. Zkoušení mechanismu

Důležitou částí je ověření mechanismu. Nedochází pouze k posouzení funkčnosti, ale i k určení nevhodně zkonstruovaných částí, které mohou být cennou zkušeností při jiném návrhu.



Obr. 4.1 Složený prototyp joysticku

Při zkoušení se objevilo několik problémů, které souvisely především s pohonem. Prvním velkou komplikací byl zvolený převodový poměr u planetové převodovky motoru. Ten byl příliš velký, což způsobovalo, že síla na páku byla i bez jakéhokoliv napájení příliš vysoká. Tento problém byl vyřešen úpravou převodovky, kdy došlo ke snížení převodového poměru. Tím ovšem došlo ke snížení maximální dosahované síly.

Následně jsem přešel na testování síly pomocí přímého napájení motoru. Při tomto testování se ukázalo, že zvolená maximální síla 50 N ukázala jako vysoká. Síla, při které byl pocitově odpor dost vysoký a podle mne pro stolní joystick dostačující se pohybovala okolo 15–20 N. Při nové konstrukci by byla tato hodnota plně dostačující. Proto se snížení převodového momentu převodovky nejeví jako velký problém.

Statická pevnost se ukázala jako dostačující, problémem může být dlouhodobé cyklické zatěžování, to ovšem požaduje dlouhodobější testování. Pevnost byla zkoušena tahem za rukojeť o síle požadované velikosti pomocí závaží, které bylo zavěšeno v místě držení rukojeti. Mechanismus byl u motoru zajištěn proti pohybu. Při příští konstrukci by bylo vhodné hřídele vyrobit z jiného materiálu. Vhodnou náhradou by mohla být konstrukční ocel. U celého mechanismu by se zvýšila tuhost a kvůli vyšší pevnosti by se zmenšily rozměry.

5. Závěr

V práci jsem se zabýval konstrukcí joysticku, který umožňuje řídit zpětnou vazbu. Úvodem jsem uvedl rešerši, která poskytla teoretické informace o silách v reálném letounu a přehled existujících řešení. Toho jsem využil při konstrukci vlastního mechanismu.

Úvodní kapitola stručně shrnula síly v řízení skutečného letounu a popsala mechanismy, které se využívaly u existujících joysticků s funkcí force feedback.

Joystick byl navrhován, aby umožnil řízení síly až do velikosti 50 N. K tomu využívá dvou motorů s převodovkou. Mechanismus využívá dvou na sebe kolmých hřídelí k ovládní pohybu v obou požadovaných osách. Součástí práce je také výkres sestavy prototypu.

Mechanismus byl následně vyroben s pomocí 3D tisku do fáze, která umožnila základní otestování funkčnosti a schopnost dosáhnout požadovaných parametrů. Elektronická část byla navržena jen na úrovni nutné pro konstrukci a funkčnost mechanismu.

Během kompletace prototypu bylo zjištěno několik konstrukčních problémů, které se podařilo odstranit. Bylo zjištěno, že původně požadovaná síla je výrazně vyšší, než by bylo nutné.

K dokončení prototypu do plně funkčního stádia chybí elektronická část. Důležitý je i program pro malý počítač, který by umožnil řídit motory a komunikoval s leteckým simulátorem. Z mechanické stránky je prototyp funkční a stačí pouze doplnit držáky elektroniky.

Seznam použitých zdrojů

[1] DANĚK, Vladimír. *Mechanika letu*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-7204-761-1.

[2] Haptic technology. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-06-21]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Haptic_technology

[3] Microsoft SideWinder. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-06-21]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Microsoft_SideWinder

[4] SideWinder Force Feedback Pro Joystick Movement Mechanism. *Petervis.com* [online]. West Croydon: Peter Vis [cit. 2020-06-21]. Dostupné z: <https://www.petervis.com/modern-gadgets/sidewinder-force-feedback-pro/force-feedback-mechanism.html>

[5] MS Sidewinder FF2 hacking. *Simprojects.nl* [online]. Roland van Roy, c2002-2015 [cit. 2020-06-21]. Dostupné z: http://www.simprojects.nl/ms_siderwinder_ff2_hack.htm

[6] PETG. *DIELECTRIC MANUFACTURING* [online]. Richfield: Dielectric Manufacturing [cit. 2020-06-21]. Dostupné z: <https://dielectricmfg.com/knowledge-base/petg/>

[7] DC motor Série PG420 s planetovou převodovkou. *StejnoseměrnéMotory.cz* [online]. Brno: Ing. Gross, Jiří, c2020 [cit. 2020-06-21]. Dostupné z: <https://www.dcmotory.cz/dc-motory-planetova-prevodovka/serie-pg420.html>

Seznam použitých symbolů a značek

Symbol	Význam
F_v, F_k, F_s	Síla na řididle klopení, klonění, zatažení
F_0, F_1	Koeficienty
ρ	Hustota vzduchu
V	Rychlost letu letadla
K_v, K_K, K_S	Převod řízení výškového kormidla, křídélka, směrového kormidla
k_{VOP}, k_{SOP}	Koeficient snížení kinetického tlaku na vodorovných ocasných plochách, svislých ocasných plochách
S_v, S_K, S_S	Plocha výškového kormidla, křídélka, směrového kormidla za osou otáčení
c_v, c_k, c_s	Střední hloubka výškového kormidla, křídélka, směrového kormidla za osou otáčení
S	Vztažná plocha křídel
\bar{x}_T	Poloha těžiště letounu
\bar{x}'_A	Poloha aerodynamického středu letounu s volným řízením
$C'_{L\alpha}$	Sklon vztlakové čáry letounu s volným řízením
$C_{H\delta}$	Součinitel závěsového momentu výškového kormidla
$C_{L\alpha}$	Sklon vztlakové čáry letounu s pevným řízením
$C_{m\delta}^*$	Součinitel klopivého momentu k aerodynamickému středu letounu s pevným řízením podle výchylky výškového kormidla
\bar{x}'_D	Poměrná poloha dynamického bodu letounu
$C_{H\delta K}$	Součinitel závěsového momentu podle výchylky křídélka
$C_{l\delta K}$	Součinitel klonivého momentu podle výchylky křídélka
$C_{l\beta}$	Součinitel klonivého momentu
$C_{l\delta S}$	Součinitel klonivého momentu podle úhlu náběhu SOP
$C_{n\beta}$	Součinitel zatačivého momentu

$C_{n\delta S}$	Součinitel zatačivého momentu podle úhlu náběhu SOP
β	Úhel vybočení letounu
$C_{H\beta SOP}$	Součinitel závěsového momentu podle úhlu náběhu SOP
σ	Horizontální úhel zešikmení proudu v místě SOP
$C_{H\delta S}$	Součinitel závěsového momentu podle výchylky směrového kormidla
F_p	Maximální síla na páce
l_p	Délka páky
k_n	Návrhový koeficient
σ_k	Mez kluzu materiálu
σ_{dov}	Dovolené normálové napětí
τ_{dov}	Dovolené tečné napětí
M_k	Kroutící moment na hřídeli
d_m	Mínimální průměr
M_m	Požadovaný kroutící moment motoru s převodovkou
i	Převodový poměr
i_r	Skutečný převodový poměr
z_1, z_2	Počet zubu malé, velké řemenice
M_r	Dosahovaný kroutící moment
M_{mot}	Kroutící moment motoru s převodovkou

Seznam obrázků a tabulek

Obrázky

2.1 Průběh síly na řídidle klopení v závislosti na rychlosti letu [2]	14
2.2 Horní část mechanismu Sidewinder Force Feedback Pro joysticku [4]	17
2.3 Pohled na mechanismus Sidewinder FF Pro joysticku [4]	18
2.4 Mechanismus joysticku Sidewinder FF 2 [5]	18
2.5 Mechanismus force feedback joysticku výrobce Guillemot	19
3.1 Demonstrátor konceptu	21
3.2 Zjednodušené schéma zapojení elektroniky	22
3.3 Model mechanismu	22
3.4 Sestava jedné hřídele	23
3.5 Mechanismus na základní desce	24
3.6 Motor PG420 s převodovkou [7]	25
3.7 Uložení motoru na napínacím mechanismu	26
3.8 Uložení hnané řemenice v mechanismu	26
3.9 Páka k upevnění konstrukce	27
4.1 Složený prototyp joysticku	28

Tabulky

2.1 CS-23 maximální síly pro ovládání výškového kormidla [2]	14
2.2 CS-23 maximální síly pro ovládání křidélek [2]	15
2.3 CS-23 maximální síla na nožních pedálech [2]	16
3.1 Přehled základních parametrů	20

Přílohy

Příloha A: Výkres sestavy joysticku