



TECHNICKÉ PREVEDENIE SPÄTOVÄZOBNÉHO SYSTÉMU RIADENIA V LETECKOM SIMULÁTORE

Samuel Zimmermann
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Filip Škultéty
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Abstract

The aim of the article is to analyse the current issue of force feedback control systems in flight simulation training devices. The first part describes the current legislative classifications of training devices and the possibilities of accepting training credits for their use in flight training. The next section deals with the description of current solutions and their advantages and disadvantages. The final part presents a proposal for the implementation of the solution in a platform formed from the cockpit of a Zlín Z-142 aircraft. It includes visualisations of the individual parts of the elevator and ailerons force feedback system created in Autodesk Inventor.

Keywords

flight simulation, training device, force feedback system, control loading

1. Úvod

Letecká doprava je najmladším a najrýchlejšie sa rozvíjajúcim odvetvím medzi jednotlivými dopravami. Aj napriek viacerým snahám automatizácie je v súčasnosti stále najdôležitejším, a zodpovedným prvkom za rozhodovanie a riadenie lietadla človek. Pilotné výcviky majú rôzne kvalifikačné kategórie, a rôzne úrovne preukazov spôsobilosti. V mnohých z nich by sme sa okrem skutočného lietadla nezaobišli bez výcvikového zariadenia, ktoré má za úlohu simulovať let. Získaný preukaz spôsobilosti pilota, či určitej kvalifikačnej kategórie má obmedzenú platnosť. Platná legislatíva definuje intervaly, v ktorých musia byť piloti pravidelne preskúšaní zo zručností potrebných pre jednotlivé spôsobilosti. Opakovací výcvik je veľakrát vykonávaný na výcvikových zariadeniach.

Aby sme výcvikové zariadenia mohli v týchto situáciách využívať musia tieto zariadenia spĺňať prísne kritéria pre kvalifikáciu. Tým vieme dosiahnuť konzistentnosť pri ich konštruovaní. Rovnako zabezpečíme, že zariadenia, ktoré sa budú používať nebudú vytvárať klamlivé podnety, a nebudú mať negatívny vplyv na základný alebo opakovací výcvik pilota.

Jedným z prvkov, ktorý poskytuje výcvikovým zariadeniam požadovanú vernosť simulácie je aj späťoväzobný systém riadenia ovládacích prvkov. Na každý objekt pohybujúci sa v zemskej atmosfére pôsobia sily a momenty, ktoré opisujú Newtonove pohybové zákony. Zemská atmosféra je meniace sa prostredie, takže aj sily či momenty pôsobiace na daný objekt nie sú konštantné. Výcvikové zariadenia na simuláciu letu sú v súčasnosti nezávislé od pohybov v atmosfére. To znamená, že jednotlivé sily musíme určitým spôsobom nahrádzať a vytvárať ich dodatočne. Na to nám slúži práve späťoväzobný systém riadenia ovládacích prvkov.

2. Klasifikácia a rozdelenie výcvikových zariadení na simuláciu letu

Pochopenie rôznych kategórií a povolení na započítavanie hodín pre letové simulátory a výcvikové zariadenia je do určitej miery zložitá. Rozdelenia sa líši aj na základe miesta, v ktorom je výcvikové zariadenie prevádzkované. Existujú rozdiely v legislatíve naprieč celým svetom. Označovanie podľa americkej FAA je mierne odlišné tomu, ktoré používajú európsky (EASA), alebo austrálsky regulátory (CASA). My sa zameriame na označovanie podľa Európskej agentúry pre bezpečnosť letectva (EASA).

Výcvikové zariadenia na simuláciu letu ako súbor všetkých výcvikových zariadení EASA terminológia označuje ako FSTD - „Flight simulation training devices“. Definície a vysvetlenie jednotlivých pojmov definuje Nariadenie Komisie (EÚ) č. 1178/2011 [1] v časti FCL.010 a zahŕňa nasledovné pojmy:

a) „**Letový simulátor** (FFS – Full Flight Simulator) znamená presnú kópiu pilotnej kabíny konkrétneho typu alebo značky, modelu a série lietadla vrátane úplnej zostavy zariadení a počítačových programov potrebných na znázornenie lietadla pri činnosti na zemi a počas letu, vizuálny systém poskytujúci výhľad z pilotnej kabíny a systém simulujúci pôsobenie síl pri pohybe.“

Tento typ výcvikového zariadenia je najsofistikovanejší a musí spĺňať najprísnejšie kvalifikačné a validačné testy. Podľa Dodatku 9 vyššie uvedeného Nariadenia vieme, že FFS môže byť využívaný v praktickom výcviku, ale ako jediný typ aj pri praktických skúškach, preskúšaníach odbornej spôsobilosti pre kvalifikačné kategórie na triedu, či typovej kvalifikačnej kategórie (MPL – Multi Pilot License a ATPL – Airline Transport Pilot Licence).

Letové simulátory sa následne ešte ďalej rozdeľujú na jednotlivé úrovne (levels) podľa počtu osí, v ktorých sa pohybový systém

dokáže pohybovať, či komplexnosti vizuálneho systému. EASA klasifikuje letové simulátory na 4 úrovniach:

- EASA Level A – pohyb v 3 osiach, systém videnia v noci,
- EASA Level B – pohyb v 3 osiach, systém videnia v noci, simulácia prostredia ATC,
- EASA Level C – pohyb v 6 osiach, systém videnia v noci a za súmraku, simulácia prostredia ATC, dynamické zaťažovanie ovládacích prvkov, vyššia vernosť,
- EASA Level D – pohyb v 6 osiach, systém videnia cez deň, za súmraku a v noci, simulácia prostredia ATC, dynamické zaťažovanie ovládacích prvkov, najvyššia vernosť [2].

b) „**Letové výcvikové zariadenie (FTD – Flight Training Device)** znamená presnú kópiu prístrojov, vybavenia, panelov a ovládacích prvkov riadenia konkrétneho typu lietadla v otvorenej alebo uzavretej pilotnej kabíne lietadla vrátane zostavy vybavenia a počítačových programov potrebných na znázornenie lietadla v podmienkach na zemi a počas letu v rozsahu systémov inštalovaných v zariadení. Nevyžaduje si systém simulujúci pôsobenie síl pri pohybe alebo vizuálny systém.“

V dôsledku toho, že sa pri tomto type nevyžaduje systém simulujúci pôsobenie síl pri pohybe a vizuálny systém, sú možnosti tohto typu obmedzenejšie.

Rozdeľovanie do úrovni podľa EASA má 3 úrovne:

- EASA FTD Level 1,
- EASA FTD Level 2,
- EASA FTD Level 3 – len vrtuľníky [2].

c) „**Trenažér letových a navigačných postupov (FNPT – Flight and Navigation Procedures Trainer)** znamená výcvikové zariadenie, ktoré predstavuje prostredie pilotnej kabíny alebo pilotného priestoru vrátane zostavy vybavenia a počítačových programov potrebných na znázornenie lietadla určitého typu alebo triedy v letových podmienkach v rozsahu zodpovedajúcom tomu, ako systémy fungujú v lietadle.“

EASA klasifikuje FNPT opäť do 3 úrovni:

- EASA FNPT Level I,
- EASA FNPT Level II,
- EASA MCC – MCC (Multi Crew Cooperation) je trenažér letových a navigačných postupov, ktorý je povolené používať pri výcviku súčinnosti viacčlennej posádky [2].

d) „**Základné prístrojové výcvikové zariadenie (BITD – Basic Instrument Training Device)** znamená pozemné výcvikové zariadenie, ktoré predstavuje stanovište žiaka – pilota triedy letúnov. Môžu využívať prístrojové panely zobrazené na obrazovkách a pružinové riadenie, čo predstavuje základ prinajmenšom pre nácvik postupov letu podľa prístrojov.“

EASA má len jednu úroveň klasifikácie tohto typu [2].

e) „**Iné výcvikové zariadenia (OTD – Other Training Devices)** sú výcvikové prostriedky iné, ako sú letové simulátory,

letové výcvikové zariadenia alebo trenažéry letových a navigačných postupov, ktoré sú prostriedkami výcviku tam, kde nie je nevyhnutné úplné prostredie pilotnej kabíny.“

Najčastejšími sú: CBT (Computer Based Trainer), PTT (Part Task Trainer) [3], CPT (Cockpit Procedures Trainer) [4], a ďalšie.

2.1. Započítavanie pozemného prístrojového času

Na to, aby letecké školy či výcvikové zariadenia (training facilities) dokázali zhodnotiť prínos zaobstarania výcvikového zariadenia na simuláciu letu akejkoľvek kategórie, musia poznať koľko hodín pozemného prístrojového času je dovolené započítavať pilotovi – žiakovi, v rámci jednotlivých pilotných kurzoch do celkového času potrebného na absolvovanie daného letového výcviku.

Nariadenie Komisie (EÚ) č. 1178/2011 ustanovuje jednotlivé požiadavky pre započítavanie prístrojového pozemného času. „**Pozemný prístrojový čas** znamená časový úsek, v ktorom pilot dostáva pokyny počas simulovaného letu podľa prístrojov s použitím FSTD.“ Ak by sme sa zamerali výlučne len na preukazy spôsobilosti pilotov letúnov (pozn. označované prídavkom „(A)“ za označením preukazu spôsobilosti – napr. PPL (A)), musíme si spomenúť minimálne nasledujúce body:

1. Časť FCL, podčasť C, oddiel 2 v bode FCL.210.A „PPL(A) – Požiadavky na prax a započítavanie“ v odseku a) vraví: „Žiadatelia o preukaz PPL(A) absolvujú najmenej 45 hodín letového výcviku na letúnoch alebo na TMG, z toho **5 hodín môžu vykonať vo výcvikovom zariadení na simuláciu letu (FSTD)**...“
2. Časť FCL, podčasť F, oddiel 2, v bode FCL.510.A „ATPL(A) – Nevyhnutné predpoklady, požiadavky na prax a započítavanie“ v odseku b) ktorý znie: „Prax. Žiadatelia o ATPL(A) absolvujú najmenej 1 500 hodín letu v letúnoch, z toho najmenej:“ a v jeho bode 4. sa dozvedáme, že: „75 hodín prístrojového času, z čoho najviac **30 hodín môže tvoriť pozemný prístrojový čas**.“ Ďalším citovaním odseku b) tiež zisťujeme, že: „Z 1 500 hodín času letu až **100 hodín sa môže absolvovať v letovom simulátore (FFS) alebo v trenažéri letových a navigačných postupov (FNPT)**. Z týchto 100 hodín sa v FNPT môže absolvovať najviac 25 hodín.“

3. Súčasné riešenia spätoväzobných systémov vo výcvikových zariadeniach

Určenie najvhodnejšieho riešenia pre akúkoľvek aplikáciu vieme najlepšie vyjadriť porovnaním výhod a nevýhod dostupných možností. Výhody sa snažíme čo možno najlepšie využiť, a nevýhody čo najúčinnejšie eliminovať, respektíve kompenzovať. Na základe tohto porovnania vieme následne jednoduchšie určiť oblasti použitia daného riešenia, jeho časti či osobitnej súčiastky [5].

3.1. Mechanické riešenia

Mechanické systémy vytvárania síl spätnej väzby využívajú čisto mechanické väzby na zabezpečenie odporu a spätnej väzby pre prvky riadenia letu. Niektoré riadidlá a riadiace páky využívajú mechanické spojenia na vytváranie odporu, čím dávajú pilotovi pocit síl v riadení bez potreby elektronických alebo hydraulických komponentov. Riešenia, ktoré nevyužívajú

automatické zaťažovanie ovládacích prvkov nazývame pasívne riešenia [6].

Jedným z najjednoduchších riešení je použitie pružinových mechanizmov na simuláciu riadiacich síl. Pružiny môžu poskytovať odporové a centrovacie sily, čo umožňuje realistejší pocit pri ovládaní [6]. Podobným riešením na vytvorenie napätia a odporu v riadiacich mechanizmoch môže byť použitie gumených lán. Takéto systémy využívajú gumené láná na simuláciu síl poskytnutím centrovacej sily a odporu okolo neutrálnej polohy daného ovládacieho prvku.

3.2. Pneumatické systémy

Riešenie spätoväzobného systému s použitím pneumatického pohonu využíva tlakový vzduch na prenos energie a riadenie mechanických pohybov. Základným komponentom týchto systémov je kompresor, ktorý stláča vzduch na prevádzkový tlak [7]. Tento stlačený vzduch, koncentrovaný v zásobníku, sa následne využíva na pohyb akčných mechanizmov, akými sú napríklad pneumatické valce, ktoré môžu vytvárať lineárny či rotačný pohyb [8].

Medzi základné výhody pneumatického systému môžeme zaradiť jeho vysokú rýchlosť vykonávania operácií. Pri lineárnych pneumatických motoroch je až 8x vyššia, a pri rotačných pohyboch sú úlohy vykonávané až s 20x vyššími otáčkami ako pri hydraulických či elektrických mechanizmoch. Oproti hydraulickým a elektrickým systémom sú z pohľadu mechaniky a elektroniky jednoduchšími systémami, keďže obsahujú menej citlivých elektrických súčiastok, čo ich údržbovo nenáročnejšími. Vďaka možnosti automatizácie a logických pracovných funkcií je možné pneumatický systém relatívne jednoducho upravovať zmenou tlaku vzduchu. Ďalšími výhodami sú tiež bezpečnosť a necitlivosť na zmeny teploty. Stlačený vzduch je nehorľavá kvapalina a predstavuje menšie riziká ako napríklad hydraulické kvapaliny. Z hľadiska rentability sú tieto systémy často lacnejšie na inštaláciu a údržbu vďaka jednoduchej a technologicky nenáročnej výrobe prvkov pneumatických systémov, ktoré nevyžadujú zvláštne pevnostné požiadavky na materiál a jeho opracovanie (hliník, plasty, keramika). Pri použití elektrických vzduchových čerpadiel môže byť prevádzka takéhoto systému tiež relatívne tichá [5, 9].

Oproti elektrickým, či hydraulickým systémom je pneumatický systém pri použití na vytváranie spätnej väzby menej presný. Najmä pri premenlivom zaťažení spôsobuje stlačiteľnosť vzduchu malú tuhosť systému. Vyvíjané sily môžu vykazovať nelineárne charakteristiky, čo sťažuje presné prispôsobenie spätoväzobných síl požadovaným simulovaným podmienkam. Bez použitia špeciálnych prvkov môže byť presnosť zastavenia v ľubovoľnej polohe takmer nedosiahnuteľná. V kombinácii s elektrickým systémom vieme túto nevýhodu podstatne eliminovať. Aj napriek celkovo nižšej údržbovej náročnosti je systém náchylný na čistotu vzduchu. Tlakový vzduch musíme upravovať aby sme odstránili mechanické nečistoty, vlhkosť a vodu. Rovnako ako pri hydraulických systémoch je potrebné pravidelne sledovať, či sa v systéme neobjavujú úniky. Vieme ich spozorovať jednoduchou diagnostikou manometrom či počutelným únikom aj bez meracích prístrojov. Okrem toho sú v porovnaní s inými metódami ovládania menej energeticky účinné [5, 9].

3.3. Elektrické systémy

Pri konštrukcii spätoväzobného systému pre výcvikové zariadenia na simuláciu letu sa na riadenie pohybu riadičiel alebo riadiaceho páky najčastejšie používajú elektrické systémy. Elektromotory sú základnými komponentami, ktoré v systéme generujú spätoväzobné sily. Pri ich výbere by sme mali zväziť požiadavky na krútiaci moment, rozsah pohybu, respektíve špecifikácie celkovej konštrukcie výcvikového zariadenia.

Elektrické systémy ponúkajú precízne ovládanie požadovanej polohy a vytvorenej sily, ktoré môže byť vytvárané opakovane bez straty presnosti. Elektromotory dokážu rýchlo reagovať na zmenu vstupných údajov, čo zlepšuje citlivosť a dynamiku systému. Vyššia úroveň ovládania umožňuje prekonfigurovať systém tak, aby zvládol rôzne zaťaženia, ktoré si vyžadujú rôzne sily, krútiace momenty a polohy. Jednoduché upravovanie úrovne spätnej väzby na simulovanie rôznych letových podmienok nám vytvára viac imerzných prostredí. Z pohľadu údržby ide o systémy bez rizík únikov kvapalín. Preto sú vhodné do prostredí, kde je potrebné dbať na čistotu a minimalizovanie kontaminácie [10].

Nevýhodou týchto systémov môže byť najmä to, že pri rovnakých rozmeroch elektrické akčné mechanizmy vytvárajú menší krútiaci moment ako napríklad hydraulické systémy. Pri neustálej prevádzke môžu vyvíjať extenzívne teplo, čím môže dochádzať k prehrievaniu, prípadne preťaženiu. Neustála prevádzka a generovanie tepla môžu mať za následok vyššie požiadavky na výkon oproti iným systémom, čo môže zvyšovať prevádzkové náklady. Zložitost' zapájania je vyššia ako u iných systémov. Okrem toho nie sú elektrické systémy vhodné do každého prostredia, a existujú riziká výbuchu či požiaru [5, 10].

3.4. Hydraulické systémy

Tieto systémy využívajú hydraulický tlak na generovanie realistických síl a ponúkajú vysokú úroveň vernosti pri simulovaní pocitov skutočného lietadla. Hlavným komponentom tohto systému sú hydraulické akčné mechanizmy.

Hydraulické akčné mechanizmy sa skladajú z hydraulického valca, čerpadla, zásobníka kvapaliny a samotnej tlakovej kvapaliny. Môžu vytvárať mechanickú prácu v podobe lineárneho alebo rotačného pohybu. Tieto akčné mechanizmy fungujú predovšetkým na základe toho, že tlak pôsobiaci na uzavretú kvapalinu sa prenáša do celej kvapaliny rovnako vo všetkých smeroch [9].

Ďalšími komponentami v systéme sú: jednotka napájania, výmenník tepla, riadiace prvky či hydraulické vedenia. Riadiace prvky ďalej rozdeľujeme na rozvádzače, prvky na riadenie tlaku (tlakové a redukčné ventily) a prvky na obmedzenie a riadenie prietoku (uzatváracie, jednosmerné a škrtiace ventily) [8].

Hlavnými výhodami takéhoto riešenia je možnosť vytvárania vysokých síl a krútiacich momentov pri relatívne kompaktnom dizajne. To z nich robí najlepšiu voľbu pre použitie v zariadeniach pracujúcich pod vysokým zaťažením. Hydraulické akčné mechanizmy dokážu vyvinúť 25-krát väčšiu silu ako pneumatické akčné mechanizmy rovnakej veľkosti. Dynamika kvapalín tiež umožňuje plynulejší pohyb v porovnaní s inými systémami, čo môže byť v špecifických podmienkach rozhodujúce pre použitie tohto systému. Nestlačiteľnosť hydraulickej kvapaliny umožňuje

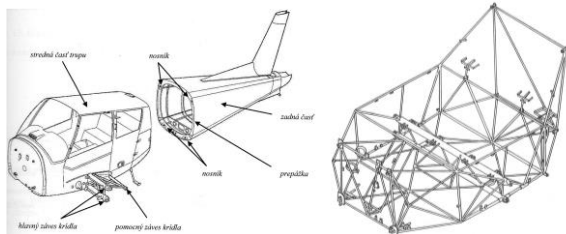
udržiavanie potrebnej sily a krútiaceho momentu bez čerpadla. Rovnako ako elektrické systémy aj systémy s hydraulickými komponentami môžu poskytovať vysokú presnosť [5, 9, 10].

Niektoré problémy, ktoré treba spomenúť, sú potenciálne úniky kvapaliny - požiadavka pravidelnej údržby na monitorovanie hladiny kvapaliny či tesnení. Olej používaný v hydraulických systémoch môže predstavovať nebezpečenstvo požiaru, preto je tento typ systému nevhodný pre niektoré priemyselné aplikácie. Samotná integrácia veľkého počtu hydraulických komponentov si vyžaduje starostlivý dizajn a ďalšie zohľadnenie dynamiky kvapaliny a tesnení [9, 10].

4. Návrh späťoväzobného systému riadenia

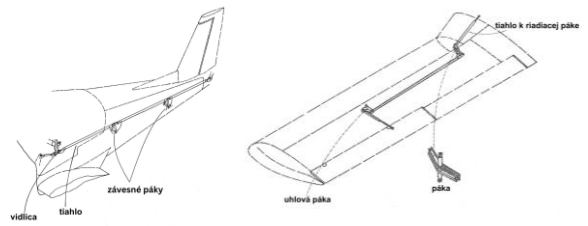
Cieľom bakalárskej práce, z ktorej vychádza tento článok bolo vybrať najvhodnejšie riešenie späťoväzobného systému pre výcvikové zariadenie na simuláciu letu a následný návrh uloženia. Ako platformu na integrovanie sme si z dôvodov predchádzajúceho prevádzkovania tohto typu na Katedre, a rovnako existujúcich simulačných dát v simulačnom prostredí Laminar Research X-Plane 12, vybrali kokpit cvičného lietadla Zlín Z-142.

Zlín Z-142 je dvojmiestne športové, výcvikové a akrobačné jednomotorové lietadlo celokovovej konštrukcie s krídlom s negatívnou šípovitosťou. Ide o modernizovanú verziu Z-42M s radovým leteckým motorom M337 AK. Trup lietadla je zmiešanej konštrukcie a delí sa na prednú, strednú a zadnú časť. Stredná časť, ktorá je zároveň aj nosnou časťou, je prútovej konštrukcie. Je zväraná z oceľových trubiek a pokrytá sklolaminátovou karosériou. Konštrukcia zadnej časti je z nosníkovej pološkupiny [11, 12, 13].



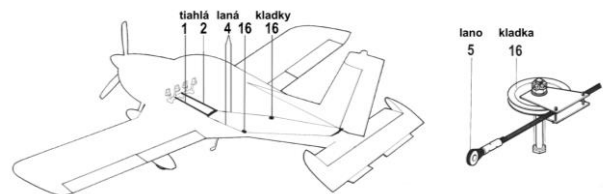
Obrázok 1. Časti trupovej konštrukcie, [11, 12]

Riadenie letúna Z-142 je priame a zdvojené. Obsahuje riadenie krídeliek a výškového kormidla ovládané riadiacou pákou. Ovládanie krídeliek a výškového kormidla je realizované systémom tiahel a uhlových a závesných pák. Výškové kormidlo nie je staticky vyvážené [11, 13].



Obrázok 2. Riadenie výškového kormidla (vľavo) a krídeliek (vpravo), [14 - upravené autorom]

Riadenie smerového kormidla a predného kolesa pomocou brzd je pedálové, nožné. Ovládanie smerového kormidla je zabezpečené zmiešané tiahlymi a oceľovými lanami. Od pedálov po medzipáku pomocou tiahel, a následne od medzipáky ku smerovému kormidlu pomocou lán [11].



Obrázok 3. Riadenie smerového kormidla, [14 - upravené autorom]

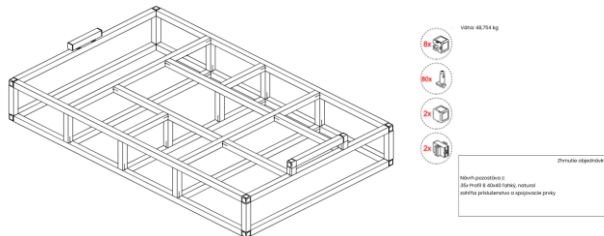
Kostru lietadla, ktoré je plánované použiť na skonštruovanie výcvikového zariadenia, a do ktorej budeme implementovať samotný návrh späťoväzobného systému pre prvky primárneho riadenia pochádza z lietadla Zlín Z-142 s pôvodnou registračnou značkou OM-PNU. V prvej fáze projektu sme na základe meraní a fotografií vytvorili digitálnu kópiu strednej časti trupu lietadla, cez ktorú prechádzajú všetky ovládacie mechanizmy. Cieľom bolo spoznať dimenzionálne parametre, ktoré výrobca v žiadnej verejne prístupnej dokumentácii neuvádza. V katalógu častí, ktorý sme používali na pochopenie umiestnení všetkých komponentov, sú jednotlivé systémy a sústavy len rozkreslené, nie však okótované. Na základe týchto meraní, a požiadavke nerozširovať samotné výcvikové zariadenie v priečnej osi sme dospeli k záveru vytvoriť podstavu pod kostru, ktorá bude primárne poskytovať priestor na uloženie komponentov späťoväzobného systému.

4.1. Konštrukcia podstavy

Rám podstavy je obdĺžnikového tvaru so šírkou 1200 mm, dĺžkou 2023,512 mm, ktoré zodpovedajú dimenziám samotnej strednej nosnej časti trupu lietadla. Výšku podstavy sme si zadali 200 mm. Návrh podstavy predpokladá pri konštrukcii použitie stavebnicových systémov hliníkových profilov.

Základnými prvkami týchto systémov sú eloxované hliníkové profily, v ktorých sú pozdĺžne drážky a otvory slúžiace k upevneniu spojovacích prvkov, či iného príslušenstva. Povrch profilov je odolný proti poškrabaniu a korózii. Konceptia systému umožňuje vytvorenie ľahšej konštrukcie, ktorá poskytuje vysokú pevnosť a presnosť, jednoduchú montáž a demontáž s čím je spojená aj vysoká variabilita. V neposlednom rade ponúka takýto systém možnosť opakovaného použitia prvkov, čím vieme optimalizovať náklady [15].

Jednou z firiem, ktorá má vo svojej ponuke vyššie uvedený systém hliníkových profilov je Haberkorn. Firma je partnerom nemeckej spoločnosti item Industrietechnik GmbH [16]. S pomocou inžinierskeho nástroja [17] tejto spoločnosti sme vytvorili návrh konštrukcie obsahujúci aj zoznam jednotlivých častí pre jej zostavenie.



Obrázok 4. Konštrukcia podstavy

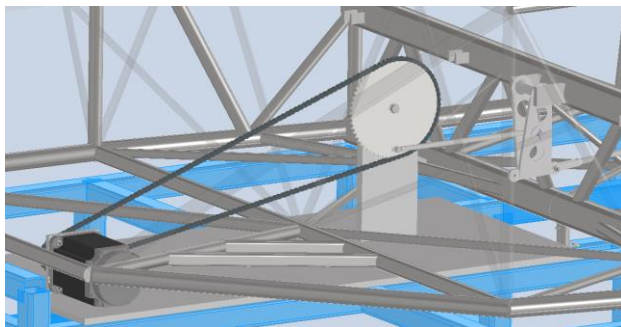
Návrh podstavy pozostáva z 35 profilov so štvorcovým prierezom 40 x 40 mm a drážkou 8 mm. Celá konštrukcia má odhadovanú váhu menej ako 50 kilogramov, a ďalej obsahuje 8 automatických spojov, 2 paralelné spoje, 2 spojovacie 2D kocky a 8 spojovacích 3D kociek.

4.2. Spätoväzobný systém riadenia výškového kormidla

Z dôvodu priestorových obmedzení, zachovania čo najväčšieho počtu pôvodne osadených komponentov a jednoduchého prístupu k prvkom systému pri následnej údržbe bude náš návrh uložený až za hlavným nosníkom, a bude sa spájať pomocou tiahla s vidlicovou pákou upevnenou k hornej pásnici hlavného nosníka.

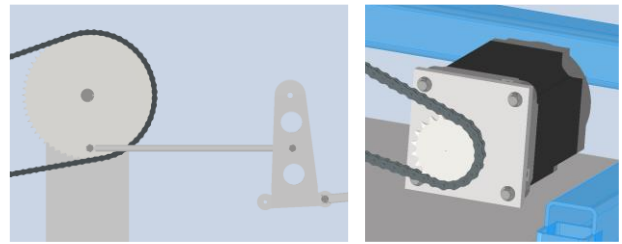
Návrh spočíva v osadení dvojice ozubených kolies spojených reťazou poháňanými elektromotorom uloženým v zadnej časti podstavy. Väčšie ozubené koleso je upevnené v rovnakej výške ako je uchytená aj vidlicová páka k hlavnému nosníku. Tiahlo je následne spojené v polovici vidlicovej páky s ozubeným kolesom.

Menšie ozubené koleso je osadené na hriadelí elektromotora. Elektromotor je upevnený k dodatočnej podlahe podstavy.



Obrázok 5. Návrh riadenia výškového kormidla

Použitý model servomotora pochádza z knižnice GrabCAD od autora Гонтар Петро [18].



Obrázok 6. Detail uloženia (výškové kormidlo)

4.3. Spätoväzobný systém riadenia krídelok

Konštrukcia prenosových prvkov riadenia krídelok je inšpirovaná riešením LaserWing miniFFB [19]. Vytváranie spätnej väzby je zabezpečované elektromotorom, ktorý je s prvkami riadiacej páky spojený dvojicou ojničných ôk a trojuholníkovou pákou. Ojničné oká sú na seba kolmé, a majú guľové kĺby. Guľové kĺby umožnia riadiacej páke posúvanie do strán a zabezpečovanie klonivého pohybu, aj pri vychýleníach v rovine klopenia.



Obrázok 7. Detail uloženia (krídelká)

Použitý model servomotora pochádza z knižnice GrabCAD od autora @Aaron Ong [20]. Model ojničného oka s guľovým kĺbom sme prebrali od autora @jimmi henry [21].

5. Záver

Cieľom bolo vybrať vhodné riešenie systému, ktorý by následne mohol byť použitý v projekte výcvikového zariadenia na simuláciu letu. Úlohou bolo tiež vytvorenie vlastného technického prevedenia takejtoho systému.

Z analýzy výhod a nevýhod možných použiteľných systémov vidíme, že najvhodnejším riešením pre našu aplikáciu je použitie elektrického systému. Prednosťami tohto systému je hlavne jeho vysoká efektívnosť, možnosť presného polohovania komponentov systému, či jednoduchá montáž a vysoká vernosť.

Návrh systému je implementovaný do prútovej konštrukcie strednej časti trupu lietadla Z-142. Riadenie výškového kormidla, ktoré bolo pôvodne zabezpečované systémom tiahliel a závesných pák je v našom návrhu nahradené elektromechanickým systémom. Ten sa skladá z dvojice ozubených kolies, reťazového prevodu a servomotora uloženého v zadnej časti konštrukcie. Pre potrebu umiestňovania komponentov bola v inžinierskom nástroji spoločnosti item Industrietechnik GmbH vytvorená podstava zo systému hliníkových profilov, na ktorú môže byť v budúcnosti umiestnená časť trupu a komponenty spätoväzobného systému. Návrh ovládania krídelok je umiestnený v tesnej blízkosti

pôvodnej riadiacej páky. Tvorí ho elektromotor, dvojica ojničných ôk s guľovými kĺbmi a trojuholníková páka. Toto usporiadanie je inšpirované *open source* riešením LaserWing miniFFB.

Pod'akovanie

Článok je publikovaný ako jeden z výstupov projektu Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu Slovenskej republiky KEGA 024ŽU-4/2023 s názvom "Integrácia najnovších vedných poznatkov v rámci zvyšovania kvality praktickej a laboratórnej výučby študijného programu Letecká doprava".

Referencie

- [1] *Nariadenie Komisie (EÚ) č. 1178/2011*. 30.10.2022. Konsolidovaná verzia.
- [2] AST-Simulators. *Simulator Levels Explained*. Online. Dostupné z: [https://www.ast-simulators.com.au/start-here/simulator-levels-explained#:~:text=Advanced%20Aviation%20Training%20Devices%20\(AATD,than%20FFS's%20and%20FTD%2FFNP T's](https://www.ast-simulators.com.au/start-here/simulator-levels-explained#:~:text=Advanced%20Aviation%20Training%20Devices%20(AATD,than%20FFS's%20and%20FTD%2FFNP T's). [cit. 2024-04-04].
- [3] *Teaching and Testing in Flight Simulation Training Devices (FSTD)*. Online. Dostupné z: <https://www.easa.europa.eu/en/downloads/22636/en>. [cit. 2024-04-04].
- [4] *Cockpit procedure trainers*. Online. Dostupné z: <https://www.flightvectors.com/Products/OTD/>. [cit. 2024-04-04].
- [5] Šupák, Marian a Almášiová, Jitka. *Pneumatické mechanizmy*. Bratislava, 2012. ISBN 978-80-8052-427-2.
- [6] Powell, John Michael. *Building Recreational Flight Simulators*. Mike's Flight Deck Books™, 2009. Dostupné z: <https://www.mikesflightdeck.com/downloads/BRFS%20S ample.pdf>.
- [7] **ABBrobotika**. *Pneumatický systém*. Online. Dostupné z: <https://abbrobotika.sk/slovník/pneumaticky-system/>. [cit. 2024-04-10].
- [8] **Stredná priemyselná škola technická**. *Mechatronika*. Online, PDF. Spišská Nová Ves. s. 61-76 Dostupné z: <https://cloud-c.edupage.org/cloud/mechatronika.pdf?z%3ArPs229i%2 BMBJ85AMJXya7NJOP2Q6iMzQi59tkLqsO5eMgOcKptFRw A%2FyIUobxMtR>. [cit. 2024-04-10].
- [9] *Electro-Mechanical vs. Hydraulic and Pneumatic Actuators*. Online. 2023. Dostupné z: <https://www.ultralibrarian.com/2023/11/17/electro-mechanical-vs-hydraulic-and-pneumatic-actuators-ulg>. [cit. 2024-04-10].
- [10] *What's the Difference Between Pneumatic, Hydraulic, and Electrical Actuators?* Online. Dostupné z: <https://www.pioneerindustrial.com/whats-the-difference-between-pneumatic-hydraulic-and-electrical-actuators/>. [cit. 2024-04-10].
- [11] **Bracíník, Tomáš a Vojtěch Schwarzmann**. *Materiálna časť ZLIN Z-43, 42, 142*. Žilina: EDIS, 2012. ISBN 9788055405971
- [12] *Zlín Z-142*. Online. Dostupné z: <https://www.muzeum-kunovice.cz/zlin-z-142/>. [cit. 2024-04-17].
- [13] *Zlín Z-142*. Online. Dostupné z: <https://www.orlita.net/z142/>. [cit. 2024-04-17].
- [14] **ZLIN Aircraft a.s.** *Katalog náhradných dielů letounu Z-142*. Zlín. č. dok. Z002.040. 2010.
- [15] *Materiál a príslušenstvo (MB)*. Online. Dostupné z: <https://www.haberkorn.cz/sk/sk/material-a-prislusenstvo/>. [cit. 2024-04-18].
- [16] *Hliníkové profily item*. Online. Dostupné z: <https://www.haberkorn.cz/sk/sk/hlinikove-profil-y-item/>. [cit. 2024-04-18].
- [17] **item**. *item Engineeringtool*. Online. Dostupné z: <https://item.engineering/CZcs/tools/engineeringtool/>. [cit. 2024-04-18].
- [18] *DC servomotor* [@Гонтар Петро]. Online. 2023. Dostupné z: <https://grabcad.com/library/dc-servomotor-2>. [cit. 2024-04-23].
- [19] *LaserWing-MiniFFB Images*. Online. Dostupné z: <https://github.com/LaserWing/LaserWing-MiniFFB/tree/main/Images>. [cit. 2024-04-12].
- [20] *Emax ECO Micro 1404 2~4S 6000KV CW Brushless Motor* [@Aaron Ong]. Online. 2024. Dostupné z: <https://grabcad.com/library/emax-eco-micro-1404-2-4s-6000kv-cw-brushless-motor-1>. [cit. 2024-04-23].
- [21] *Ball Joint 3mm, 2.5mm, 2mm* [@jimmi henry]. Online. 2022. Dostupné z: <https://grabcad.com/library/ball-joint-3mm-2-5mm-2mm-1>. [cit. 2024-04-23].