

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV POČÍTAČOVÝCH SYSTÉMŮ
FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY
DEPARTMENT OF COMPUTER SYSTEMS

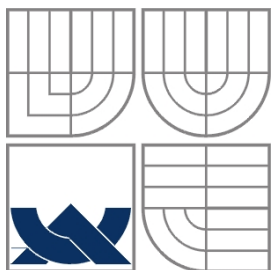
AEROWORKS: PANEL ZADÁVÁNÍ MÓDŮ PRO
SYSTÉM AUTOPILOTA

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

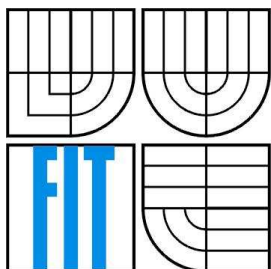
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

PETER CIBULA

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV POČÍTAČOVÝCH SYSTÉMŮ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY
DEPARTMENT OF COMPUTER SYSTEMS

AEROWORKS: PANEL ZADÁVÁNÍ MÓDŮ PRO SYSTÉM AUTOPILOTA

AEROWORKS: MODE SELECTION PANEL FOR AUTOPILOT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

PETER CIBULA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. PETER CHUDÝ, Ph.D. MBA

BRNO 2012

Abstrakt

Tato práce se zabývá implementací aplikace pro panel zadávání módů pro systém autopilota. Popisuje systémy automatického řízení letu od jejich počátků až po současnost. Zabývá se modelem prostorového pohybu letounu. Dále popisuje hardwarovou charakteristiku panelu pro zadávání módů, aplikaci, kterou je panel nahrán, z hlediska implementace a funkčnosti, testování na leteckém simulátoru SimStar a plány do budoucna.

Abstract

This thesis deals with the implementation of the application for the autopilot mode selection panel. It describes automatic flight control systems from their origins to the present. It deals with the spacial model of aircraft motion. It also describes the hardware characteristics of the panel, the application in terms of implementation and functionality, testing on flight simulator SimStar and future plans.

Klíčová slova

AeroWorks, letadlo, autopilot, panel zadávání módů, letové přístroje, SimStar, letecký simulátor.

Keywords

AeroWorks, aircraft, autopilot, mode selection panel, flight controls, SimStar, flight simulator.

Citace

Cibula Peter: AeroWorks: Panel zadávání módů pro systém autopilota, bakalářská práce, Brno, FIT VUT v Brně, 2012

AeroWorks: Panel zadávání módů pro systém autopilota

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Petra Chudého, Ph.D. MBA.

Další informace mi poskytli Ing. Petr Ditttrich, Ing. Václav Šimek a Mgr. Karol Rydlo.

Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

.....

Peter Cibula
22. května 2012

Poděkování

Chcel by som poďakovať Ing. Petrovi Chudému, Ph.D. MBA za vynikajúce vedenie bakalárskej práce a neustálu podporu pri práci na nej, Ing. Petrovi Ditttrichovi a Ing. Václavovi Šimkovi za pomoc v otázkach hardwaru, Mgr. Karolovi Rydlovi, Jochen Crombezovi a Hannes De Volderovi za pomoc vo fázach testovania.

© Peter Cibula, 2012

Tato práce vznikla jako školní dílo na Vysokém učení technickém v Brně, Fakultě informačních technologií. Práce je chráněna autorským zákonem a její užití bez udělení oprávnění autorem je nezákonné, s výjimkou zákonem definovaných případů..

Obsah

Obsah	1
1 Úvod.....	2
2 Model priestorového pohybu lietadla	3
2.1 Lietadlo a Zem	4
2.2 Lietadlo a jeho ťažisko	5
2.3 Lietadlo a okolitý vzduch	8
3 Systémy automatického riadenia letu	10
3.1 História autopilotov	10
4 Požiadavky na systém autopilota	13
4.1 Charakteristika letových veličín.....	13
5 Zadávací panel	17
6 Popis vlastného riešenia	19
6.1 Nastaviteľné veličiny.....	19
6.2 Spustenie a ovládanie	21
7 Testovanie	25
7.1 Letecký simulátor SimStar	25
7.2 Komunikačný protokol.....	26
8 Záver	28

1 Úvod

Riadenie lietadla vyžaduje neustálu plnú sústredenosť pilota. Zvlášť pri dlhších letoch, zhoršenej viditeľnosti alebo zlých poveternostných podmienkach je to extrémne dôležitý a náročný predpoklad bezpečného a pohodlného letu. Aj toto bol jeden z dôvodov, prečo vznikali systémy automatického riadenia letu a boli neustále zdokonaľované.

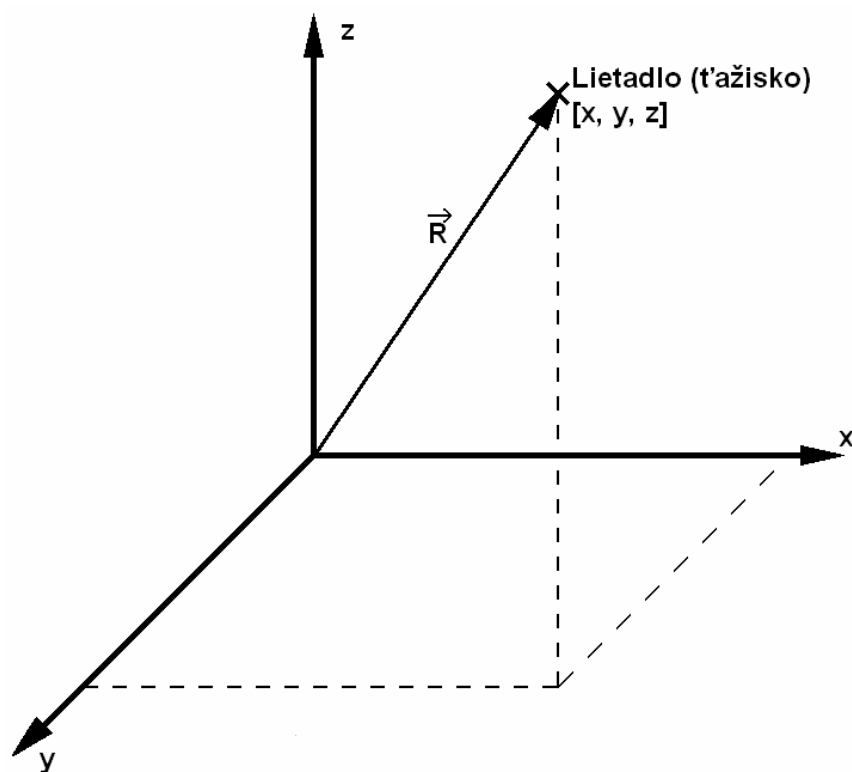
Úlohou tejto bakalárskej práce bolo implementovať aplikáciu s funkcionalitou pre nastavovanie letových parametrov závislých na konfigurácii systému, určenú pre panel zadávania módov pre systém autopilota do lietadla. Aplikácia by mala spĺňať bezpečnostné kritéria z hľadiska zadávania letových parametrov. Následne by mal byť panel s nahranou aplikáciou pripojený k leteckému simulátoru SimStar, situovanom v priestoroch Fakulty Inormačných Technológií v Brne. Panel by mal slúžiť ako podporný nástroj pre aktivity v oblasti výskumu, návrhu a vývoja digitálnych systémov riadenia letu. Taktiež by mal preveriť optimálnosť rozloženia komponent ovládajúcich jednotlivé letové veličiny a celú funkčnosť kontrolného panela.

2 Model priestorového pohybu lietadla

Kapitola vychádza z: [1], [2].

V letectve a kozmonautike existuje veľké množstvo súradnicových systémov, vzhľadom na ktoré je možno vzťahovať polohu, orientáciu alebo pohyb lietadiel. Pre názornosť uvediem aspoň niektoré:

- **Geocentric inertial axis system** – tento súradnicový systém má počiatok v strede Zeme. Jeho x-ová os je spojnicou stredu Zeme a stredu Slnka. Os z smeruje zo stredu Zeme k severnému pólu a os y je určená pravidlom pravej ruky. (Pravidlo pravej ruky určuje umiestnenie jednotlivých osí v súradnicovom systéme. Funguje na princípe usporiadania jednotlivých osí tak, že keby sme pravú ruku položili na x-ovú os v smere jej orientácie tak, že zohnutím prstov by sme ukazovali smerom k osi y, tak vystretý palec bude ukazovať v smere osi z.)
- **Earth-fixed axis system** – súradnicový systém s počiatkom v strede Zeme, rotujúci spoločne so Zemou. U tohto súradnicového systému bývajú osy vhodne vybrané podľa potreby. Príklad tohto súradnicového systému je zobrazený na *Obrázku 1*.



Obrázok 1: Príklad zvolenia ôs v *Earth-fixed axis* systéme

- **Geocentric Earth-fixed axis system** – súradnicový systém s počiatkom v strede Zeme, pohybujúci sa a rotujúci spoločne so Zemou. Rozdiel oproti predošlému súradnicovému systému je ten, že má pevne dané osy. X-ová os je priamka spájajúca stred Zeme s priesečníkom Greenwichského poludníka a rovníku. Z-ová os je predĺžením rotačnej osy Zeme a ypsilonová os dopĺňa pravouhlý systém pomocou pravidla pravej ruky.

- **Normal Earth-fixed axis system** – systém s kladnou časťou osy z smerujúcou nadol, keď osa z prechádza stredom Zeme.
- **Vehicle-carried orbit-defined axis system** – systém s počiatkom sústredeným do letúnu (najčastejšie do jeho ťažiska), pohybujúceho sa po obežnej dráhe Zeme – orbite. Z-ová os smeruje nadol a ypsilonová doprava od smeru pohybu telesa. Os x je doplnená pravidlom pravej ruky.
- **Vehicle-carried normal Earth axis system** – systém s rovnakou orientáciou ako *Normal Earth-fixed* systém s jediným rozdielom v počiatku. U tohto systému je posunutý do telesa. Zvyčajne do jeho ťažiska. Orientácia tohto súradnicového systému je znázornená na *Obrázku 2*.
- **Body axis system** – systém fixovaný na teleso s počiatkom zvyčajne v ťažisku a nasledovnými osami: pozdĺžna os (x), priečna os (y) a zvislá os (z). Súradnicový systém je znázornený na *Obrázku 2*.
- **Air-path axis system** – súradnicový systém s počiatkom v telese (zvyčajne v ťažisku). X-ová os je orientovaná pozdĺžne v smere pohybu letúnu relatívne k smeru prúdenia vzduchu. Ypsilonová os je kolmá na pozdĺžnu s kladnou orientáciou smerom doprava. Zetová os je kolmá na tieto dve a jej orientácia je daná pravidlom pravej ruky.

Toto sú len niektoré z existujúcich súradnicových systémov. Niektoré sú špecifické len pre kozmonautiku alebo letúny dosahujúce extrémnych výšok. Pre potreby všeobecného letectva alebo malého športového letectva sú v praxi použiteľné len niektoré z nich. V závislosti na zvolenom súradnicovom systéme je možné zdefinovať statické parametre lietadla - polohu, teda súradnice a orientáciu letúnu, ale aj dynamické parametre, akým je napríklad rýchlosť.

2.1 Lietadlo a Zem

Pohyb telesa predstavuje zmenu jeho polohy. Aby sme mohli určiť túto zmenu, musíme poznať jeho polohu. Tá môže byť vyjadrená buď ako vektor alebo ako usporiadaná trojica súradníc [x, y, z], ako je možné vidieť na *Obrázku 1*. Na vyjadrenie polohy, či už pomocou vektora alebo pomocou trojice súradníc, sa používa *Earth-fixed* súradnicový systém. Vektor začína v počiatku súradnicovej sústavy, teda v strede Zeme, a smeruje do ťažiska letúnu. Jeho veľkosť vyjadruje vzdialenosť od počiatku súradnicovej sústavy a je vyjadrená v nasledovnej rovnici:

$$R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (1)$$

Použitím rovnakého súradnicového systému je možné definovať pohyby letúnu, ako zmenu jeho polohy. Vzhľadom na Zem rozoznávame dva základné druhy pohybov:

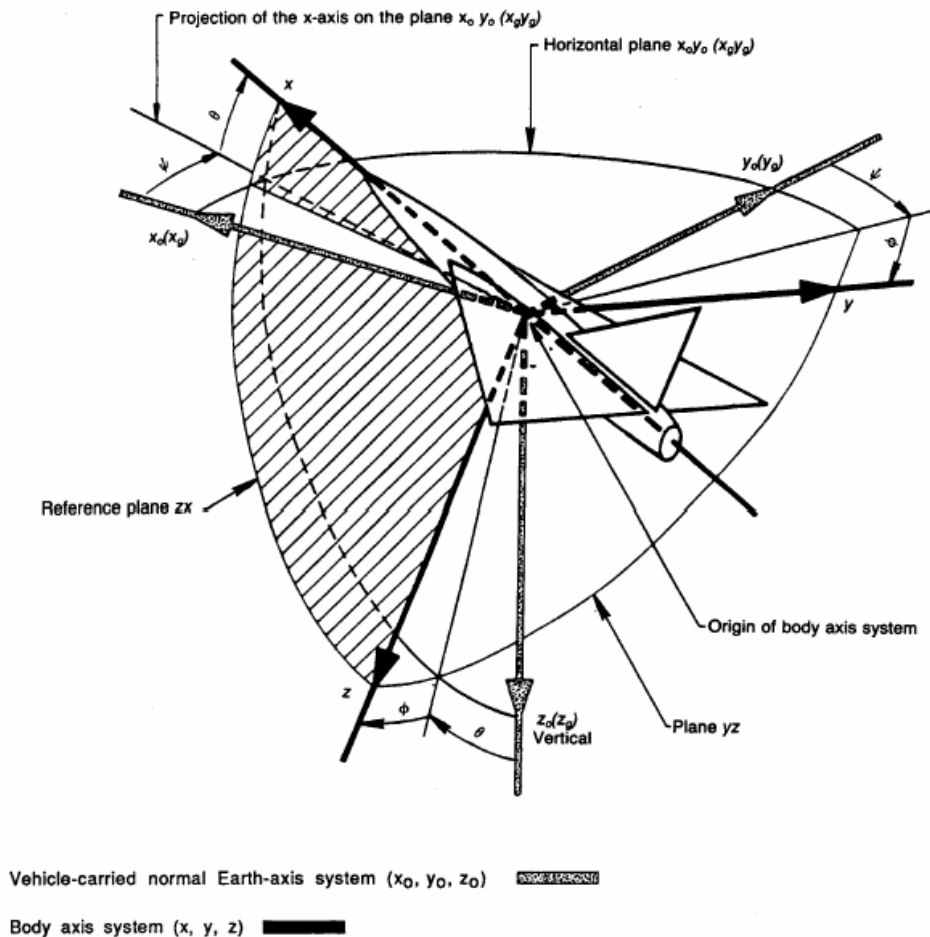
- **Vertikálne** – stúpanie a klesanie, teda zmena z-ovej súradnice karteziánskeho súradnicového systému.
- **Horizontálne** – súvisia so zmenou kolmého priemetu lietadla na zemský povrch – so zmenou súradníc x a y, teda zmenou zemepisných súradníc lietadla (zemepisnej šírky a dĺžky).

Informácia o výške, v ktorej sa lietadlo nachádza, je v praxi odvodzovaná z údajov o nameranom tlaku a teplote okolitého vzduchu. Informácie o polohe sú zväčša získavané pomocou GPS (Global Positioning System). Tento systém zistí vzdialenosti od troch alebo viacerých satelitov GPS siete a z týchto údajov dopočíta informáciu o polohe letúnu. Údaje o výške a polohe sú následne prekonvertované do pravouhlého súradnicového systému s vhodným počiatkom súradnicovej sústavy.

Buď stred Zeme, ako pri nami zvolenej metóde, alebo nejaký vhodný bod na zemskom povrchu, kedy pri menšej ploche výseku zemského povrchu je možné predpokladať, že zemský povrch je rovina.

2.2 Lietadlo a jeho ťažisko

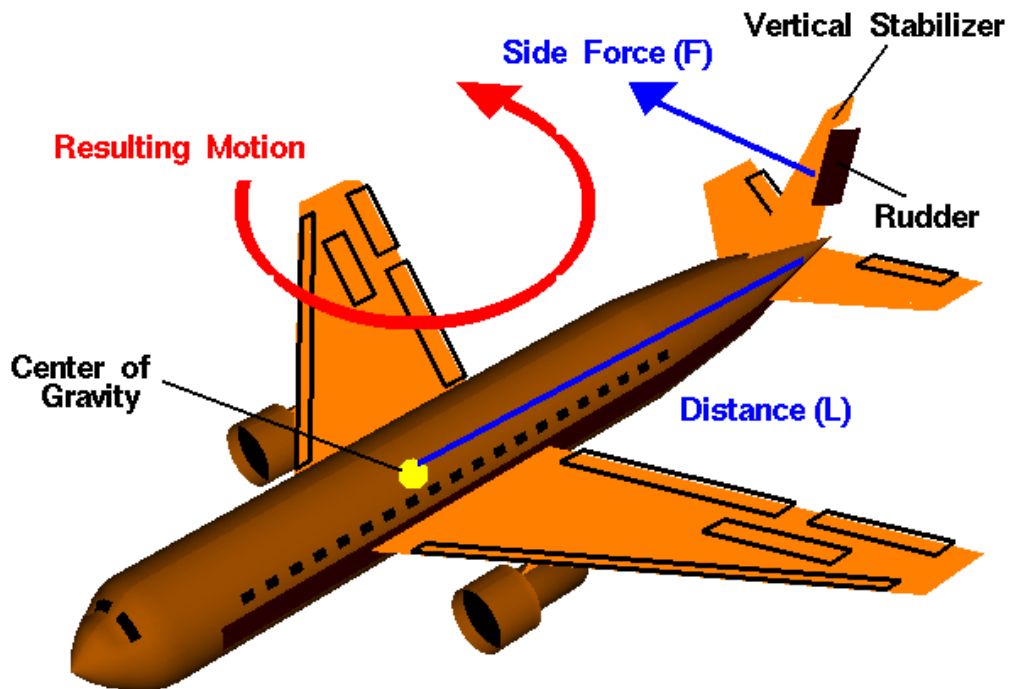
Transformáciu z *Vehicle-carried normal Earth* súradnicového systému na *Body axis system* charakterizujú tri základné pohyby. Súvisia s rotáciou okolo jednotlivých osí lietadla. Na *Obrázku 2* je zobrazená vzájomná poloha spomínaných dvoch referenčných súradnicových systémov.



Obrázok 2: Orientácia *Body axis* systému vzhľadom na *Vehicle-carried normal Earth* súradnicový systém

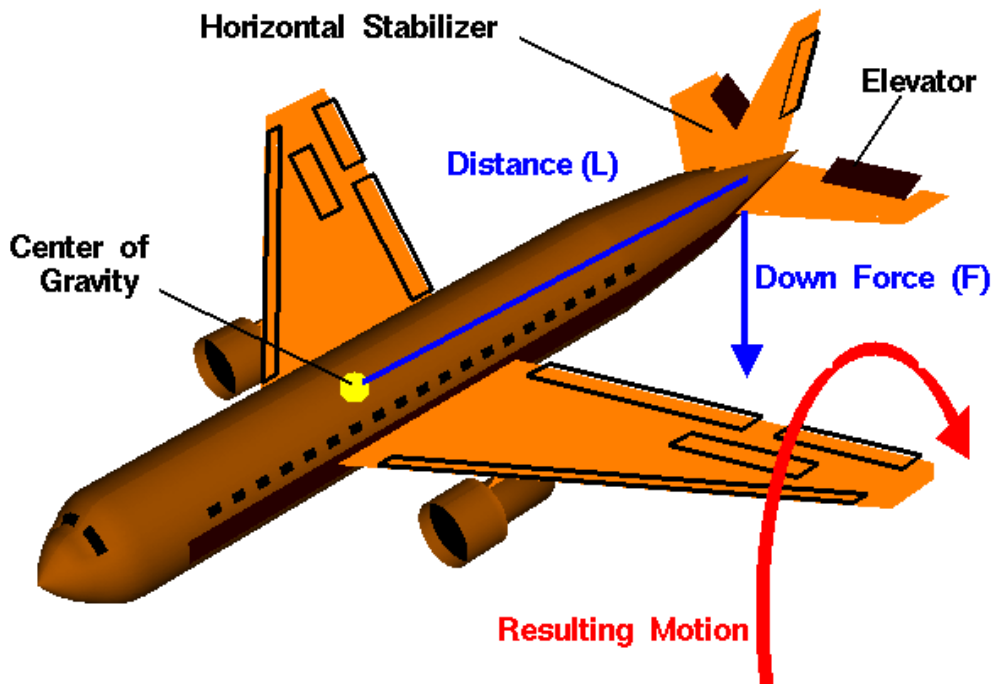
- **Zatáčanie – yaw** – zmenou azimutu (rotáciou okolo z-ovej osy *Vehicle-carried normal Earth* systému) docielime zhodu x-ovej osy súradnicového systému s projekciou pozdĺžnej osy letúnu do horizontálnej roviny prechádzajúcej počiatkom súradnicových systémov (ťažiskom lietadla). (Vid' *Obrázok 2*.) Tento pohyb slúži na zmenu kurzu letu a udáva sa v stupňoch vzhľadom na sever. Označuje sa gréckym písmenom Ψ (Psi), kladné hodnoty nadobúda pri otáčaní lietadla doprava a pohybuje sa v rozmedzí -180° až 180° . Dosahuje sa smerovým kormidlom alebo zjednodušene smerovkou (ang. rudder), ktoré je situované na zvislej časti chvostového krídla lietadla. Vychýlením smerovky, napríklad smerom doľava v smere pohybu lietadla, sa zvýši rýchlosť prúdenia vzduchu na pravej strane krídla, čo spôsobí rozdiel tlaku na jednotlivých stranách krídla, a teda pôsobenie vztlakovej sily smerom doprava. Táto sila

chvost lietadla zatlačí smerom doprava a lietadlo sa okolo svojho ťažiska začne otáčať smerom vľavo. (Vid' Obrázok 3.) Pri vychýlení smerového kormidla smerom doprava bude pohyb lietadla opačný.



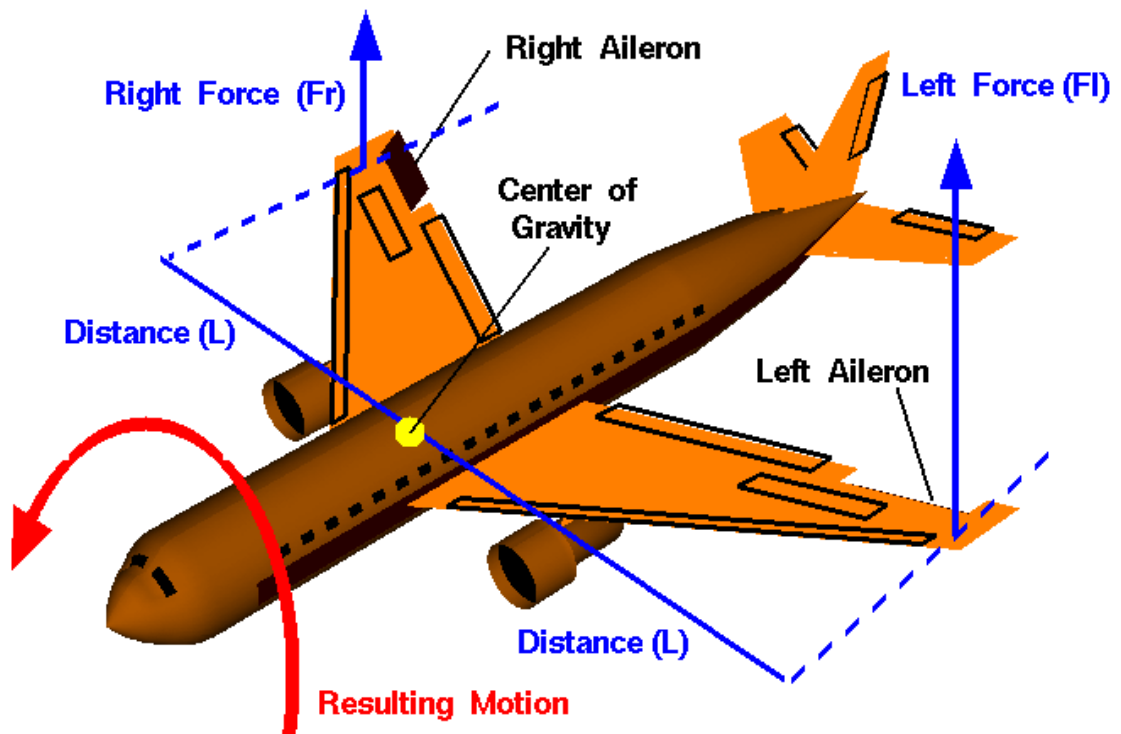
Obrázok 3: Zatáčanie a smerové kormidlo

- Klopenie – pitch** – rotácia okolo priečnej osy lietadla spôsobí (zmenou uhlu sklonu) zhodu osy x *Vehicle-carried normal Earth* súradnicového systému s pozdĺžnou osou *Body axis* systému. (Vid' Obrázok 2.) Ide o pozdĺžny pohyb - prebieha v rovine symetrie – zvislej rovine, pozdĺžne prechádzajúcej lietadlom. Slúži na otáčanie letúnu v smere nahor alebo nadol, teda spôsobuje stúpanie alebo klesanie lietadla. Udáva sa v stupňoch vzhľadom na horizontálnu rovinu. Označuje sa gréckym písmenom Θ (Theta) a kladných hodnôt nadobúda pri zmene sklonu smerom nahor. Jeho rozsah je od -90° do 90° a dosahuje sa výškovým kormidlom alebo výškovkou (ang. elevator), ktoré je umiestené na chvoste lietadla. Vychýlením výškovky, napríklad smerom nahor sa zvýši rýchlosť prúdenia vzduchu pod krídlom, čo spôsobí rozdiel tlaku nad a pod krídlom, a teda pôsobenie vztlakovej sily smerom dolu, kolmo na krídlo. Táto sila chvost lietadla zatlačí smerom dolu a lietadlo sa okolo svojho ťažiska začne otáčať tak, že predok lietadla bude stúpať. (Vid' Obrázok 4.) Pri vychýlení smerového kormidla smerom nadol bude pohyb lietadla opačný.



Obrázok 4: Klopenie a výškové kormidlo

- **Klonenie – roll** – dôsledkom rotácie lietadla okolo pozdĺžnej osy je zmena náklonu letúnu a následná zhoda ypsilonovej osy *Vehicle-carried normal Earth* súradnicového systému s priečnou osou *Body axis* systému. (Vid' Obrázok 2.) Tento pohyb slúži na zmenu smeru trajektórie letu a udáva sa v stupňoch vzhľadom na zemský horizont. Označuje sa gréckym písmenom Φ (Phi). Rozsah klonenia je -180° až 180° a kladné hodnoty nadobúda v prípade rotácie v smere hodinových ručičiek z pohľadu pilota – keď pravé krídlo klesá a ľavé stúpa. (Vid' Obrázok 5.) Klonenie je možné dosiahnuť navzájom opačným pohybom krídeliek (ang. ailerons) na jednotlivých krídlach – na jednej strane nadol a na druhej nahor. Po vychýlení krídeliek vzniká klonivý moment nakláňajúci lietadlo. To spôsobí rozdielnu zmenu vztlaku na oboch krídlach a následné otočenie lietadla.

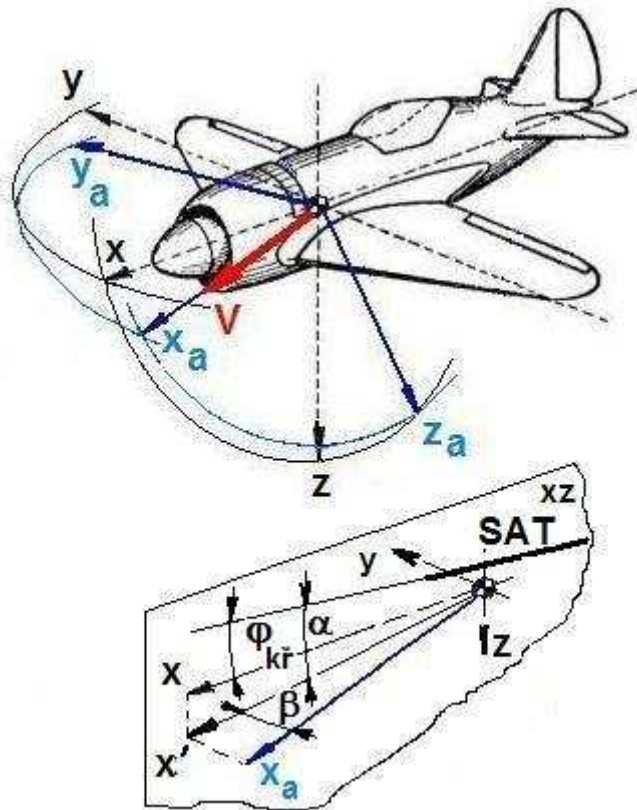


Obrázok 5: Klonenie a krídelká

2.3 Lietadlo a okolitý vzduch

Vzhľadom na *Body axis system* a *Air-path axis system* rozoznávame 2 druhy uhlov, zvierané smerom pohybu letúnu a prúdením okolitého vzduchu, ktoré si u lietadla všímame. Ich poloha vzhľadom na lietadlo je zobrazená na Obrázku 6.

- **Uhol vybočenia – sideslip angle** – uhol medzi rýchlosťou letúnu, relatívnou k prúdeniu okolitého vzduchu a projekciou osy x *Air-path axis* systému do roviny zx (zvieranej pozdĺžnou a zvislou osou) *Body axis* systému. Ide o natočenie lietadla v horizontálnom smere v závislosti na smere prúdenia vzduchu. (Vid' Obrázok 6.) Označuje sa ako β a jeho jednotkou sú stupne. Hodnoty sa nachádzajú v rozmedzí od -90° do 90° a kladné hodnoty nadobúda v prípade, že vzduch naráža na pravú stranu lietadla.
- **Uhol nábehu – angle of attack** – uhol, ktorý zvierá pozdĺžna os letúnu s projekciou rýchlosti letúnu relatívnej k prúdu vzduchu do referenčnej roviny. (Vid' Obrázok 6.) Teda uhol prúdu vzduchu a tetivy profilu krídla (spojnice medzi krajnými bodmi profilu – na nábehovej (prednej) a odtokovej (zadnej) hrane). Označuje sa gréckym písmenom α a jeho jednotkou je stupeň. Rozsah hodnôt je od -180° do 180° a kladných hodnôt nadobúda v prípade, že vzduch naráža na krídlo zo spodnej strany, teda pri stúpajúcej tendencii lietadla. Čím je tento uhol väčší, tým je väčšia vztlaková sila pôsobiaca na krídlo. Avšak len do určitého uhlu, kedy sa priliehajúci prúd vzduchu odtrhne od hornej časti krídla a dôjde k strate vztlaku na krídle.



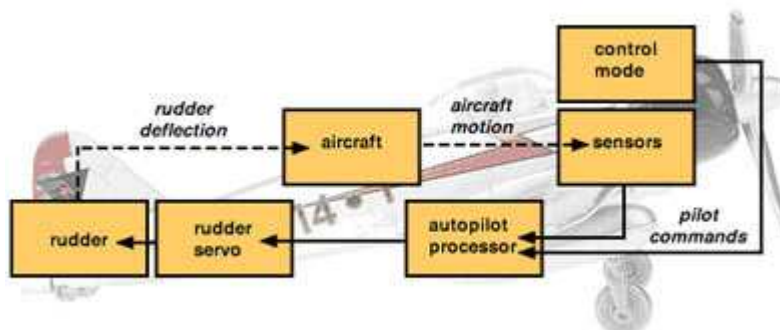
Obrázok 6: Uhol nábehu a vybočenia (φ – uhol nastavenia – zovretý tetivou profilu krídla a pozdĺžnou osou trupu lietadla) (prevzaté z [3])

3 Systémy automatického riadenia letu

Kapitola vychádza z: [4], [5],[6].

Systém automatického riadenia letu, zjednodušene autopilot, je automatické zariadenie zabezpečujúce let po zvolenej trajektórii. V digitálnej verzii sa jedná o počítačom riadený systém, ktorý aktívne zasahuje do riadenia priebehu letu. Primárnou funkciou jednoduchých autopilotov je stabilizácia horizontálneho letu a vedenie letúnu po nastavenom kurze. Modernjšie autopiloty umožňujú let po vopred naprogramovanej priestorovej trajektórii.[7] Autopilot je dôležitou súčasťou systémov veľkých lietadiel, prekonávajúcich väčšie vzdialenosti. Vďaka dostupnosti kritických komponentov (gyroskopy, digitálne magnetometre, digitálne riadené elektromechanické aktuátory) sa stáva čoraz bežnejšou súčasťou výstroje menších lietadiel, slúžiacich pre lety na kratšie vzdialenosti alebo rekreačnú a športovú činnosť.

Pred spustením autopilota zadá pilot cez zadávací panel údaje, ktoré vyžaduje, aby autopilot udržiaval. Po spustení autopilot vyšle signály do servomechanizmov (zjednodušene serv), ktoré pomocou motorov alebo hydrauliky ovládajú jednotlivé riadiace plochy lietadla tak, aby udržiavali zadané kritéria pre let. Ak dôjde, napríklad na základe vonkajšieho prostredia, k vychýleniu od nastavených letových veličín, senzory v servách odošlú informáciu o tejto zmene do riadiaceho centra autopilota. To informáciu spracuje, vypočíta nové parametre pre návrat do prednastavenej polohy a odošle ich do serv, aby podľa nich vykonali potrebné zmeny riadiacich plôch, a tak vrátili letún do pôvodnej, prednastavenej, konfigurácie. Na Obrázku 7 je znázornená schéma interakcie jednotlivých komponent systému autopilota zovšeobecnená na príklade smerové kormidla letúnu.



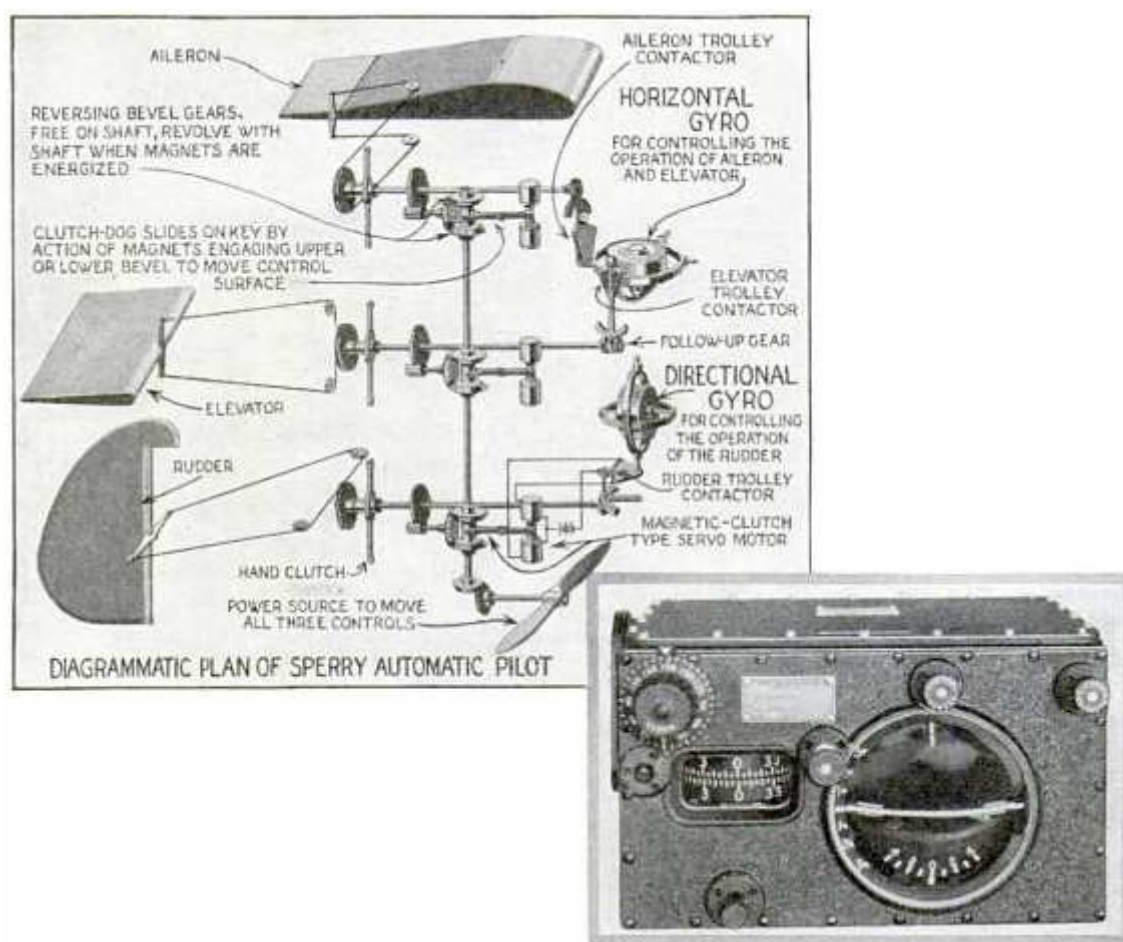
Obrázok 7: Interakcia komponent autopilota pri ovládaní smerovky

Podľa toho, do akej miery môžu systémy autopilota s lietadlom manévrovať, sa delia na jednoosé, dvojosé a trojosé. Jednoosé systémy autopilota umožňujú rotáciu lietadla len v jednej zo súradnicových osí letúnu. Zvyčajne to býva pozdĺžna os. Umožňujú teda pozdĺžnu rotáciu. Slúžia na udržiavanie roviny krídel vo vodorovnej polohe – stabilizáciu letu. Dvojosé systémy k pozdĺžnej ose pridávajú priečnu os lietadla, čím umožňujú udržiavať stanovenú výšku letu. Popríklad regulovať veľkosť rýchlosti stúpania resp. klesania. Trojosé autopiloty priberajú poslednú – zvislú os lietadla a umožňujú tým ovládanie smeru letu, udržiavanie kurzu, príp. stanovenej trajektórie.

3.1 História autopilotov

Historicky prvým leteckým autopilotom bol gyroskopický autopilot Lawrence Burst Sperryho. Bol založený na vynáleze jeho otca, Elmer Ambrose Sperryho - renomovaného amerického vynálezcu, na

gyrokompane. Gyrokompas bol pre svoje veľké rozmery určený pre námornú dopravu a našiel v krátkej dobe uplatnenie na viac ako tridsiatich amerických vojnových lodiach. Len 4 roky po dokončení gyrokompasu a ani nie 10 rokov od prvého úspešného letu bratov Wrightovcov vznikol prvý systém autopilota. Lawrencovi Sperrymu sa podarilo zmenšiť otcov vynález a pripojiť ho k systému ovládajúcemu riadiace plochy lietadla. Jeho hlavnou úlohou bolo udržiavať smer a výšku letu. Systém bol nazvaný gyroskopický stabilizačný aparát. Zobrazený je na *Obrázku 8*, spolu s kresbou znázorňujúcou, ako aparát riadil lietadlo. Po sérii testov bol prvýkrát verejnosti predstavený vo Francúzsku 18. júna 1914 na Súťaži bezpečnosti letectva, kde po troch preletoch nad Seinou s demonštráciou systému, vyhral. Prvý prelet predviedol so zdvihnutými rukami, takže nimi nemohol ovládať lietadlo. Pri druhom predviedol automatickú stabilizáciu letu po vychýlení lietadla, ktoré spôsobil jeho asistent, ktorý vyliezol na krídlo – mimo ťažisko lietadla. Pri treťom prelete sa pridal k svojmu asistentovi a sám vyliezol na opačné krídlo, takže lietadlo nebolo nikým riadené. Tento systém bol taktiež schopný vzletu a pristátia.



Obrázok 8: Sperryho automatický pilot alebo gyroskopický stabilizačný aparát (prevzaté z [8])

Gyroskopický autopilot bol stavaný predovšetkým na stabilizáciu letu a zvládal len jemné manévre. Jeho komerčná verzia využívala hydraulické servá, ktoré pomaly reagovali, a preto tento systém nebol vhodný do nepriaznivých poveternostných podmienok. Na základe týchto zistení bol firmou Sperry Gyroscope Co. vytvorený nový model autopilota – A-5 Automatic Pilot. Bol to prvý plne elektrický systém autopilota. Bol založený na troch elektrónkových zosilňovačoch – každý pre jednu z osí riadiaceho systému lietadla: zatáčanie, klopenie a klonenie. Zosilňovače umocnili signál zo sen-

zorov vysokorýchlostných gyroskopov, ktorými boli ovládané elektro-hydraulické servá, čo poskytovalo rýchlu reakciu na stabilizáciu letúnu.

Systémy automatického riadenia letu prechádzali postupným vývojom. Boli zdokonaľované a obohacované o rôzne novinky, napr. v podobe rôznych bezpečnostných mechanizmov, podporných systémov alebo navigácie. Moderné autopiloty sú sofistikovanými systémami vykonávajúcimi rovnaké úkony ako samotní piloti. Niektoré činnosti dokonca vykonávajú lepšie – jemnejšie, bezpečnejšie a efektívnejšie. Teda s ohľadom na hladkosť a bezpečnosť priebehu letu a aj na nižšiu spotrebu paliva. Komplexné systémy moderných autopilotov zahŕňajú množstvo elektroniky od navigácie, cez komunikáciu a systémy zabezpečujúce vyhybanie sa kolíziám, až po prístroje monitorujúce počasie. Na najvyšších úrovniach umožňujú vysoko presné manévry, ako je napríklad aj pristátie za nulovej viditeľnosti.

Systém autopilota sa nachádza takmer vo všetkých väčších novodobých dopravných lietadlách a v závislosti od veľkosti a určenia lietadla sa aj jednotlivé typy automatických pilotov líšia. Najvšestrannejšie a najkomplexnejšie autopiloty dokážu manipulovať s letúnom vo všetkých troch osiach otáčania. Okrem klasických senzorov pre polohu lietadla obsahujú rôzne pomocné systémy, ako je napríklad GPS (Global Positioning System) alebo ILS (Instrument Landing System) – systém asistujúci pri pristávaní alebo schopný samostatného pristátia bez asistencie pilota, a bezpečnostné prvky umožňujúce odpojenie autopilota, v prípade jeho poškodenia alebo zlyhania, a prechod na manuálne riadenie. U autopilotov umožňujúcich nastavenie vertikálnej rýchlosti, je dôležitou súčasťou aj tzv. Autothrust, ktorý reguluje ťah motora (motorov). Na týchto pokročilých systémoch automatického riadenia letu je možné nastaviť rôzne veličiny, ako rýchlosť a letovú hladinu (viď sekcia 5.1), letový kurz, poprípade konkrétnu trasu, ktorá je korigovaná pomocou GPS. Na *Obrázku 9* je ukážka moderného zadávacieho panela systému autopilota z najväčšieho dopravného lietadla - Airbus A380.



Obrázok 9: Riadiaci panel autopilota z Airbusu A380 (prevzaté z [9])

4 Požiadavky na systém autopilota

U systémov autopilota, ako u zariadení mnohokrát zodpovedajúcich za životy veľkého množstva ľudí, je kladený veľký dôraz na bezpečnosť a spoľahlivosť. Systém autopilota býva, v súvislosti s typom lietadla, prepojený s rôznymi systémami v lietadle a umožňuje ovládanie chodu lietadla napr. cez riadenie uhlu nábehu, otáčania okolo pozdĺžnej osi či reguláciu ťahu motora, resp. motorov. V závislosti od typu lietadla sa líšia aj požiadavky kladené na systém autopilota.

Programovaný riadiaci panel autopilota je prispôsobený potrebám a možnostiam malého športového lietadla Evektor EV-97 SportStar MAX, zobrazeného na *Obrázku 10*. Typu lietadla boli podriadené celkové požiadavky na funkčnosť systému a bezpečnosť letovej prevádzky. Pre naše účely by mal postačovať jednoduchý systém automatického riadenia letu, ktorý by mal byť schopný zabezpečiť dosiahnutie a udržiavanie zvolenej rýchlosti, výšky, vertikálnej rýchlosti a kurzu letu. Zadávací panel umožňuje zadávanie piatich základných letových veličín: rýchlosti, výšky, vertikálnej rýchlosti, magnetického kurzu a zemepisného kurzu.



Obrázok 10: Malé športové lietadlo Evecor EV-97 SportStar MAX (prevzaté z [10])

4.1 Charakteristika letových veličín

V letectve sú vo väčšine krajín využívané prevažne námorné (anglosaské) jednotky (námorné míle a stopy).

Rýchlosť:

Časť čerpá informácie z: [11], [12].

V leteckom priemysle existuje viacero druhov rýchlostí, medzi ktorými sú väčšie alebo menšie rozdiely, a je nutné ich rozlišovať. Rýchlosti bývajú zväčša vyjadrené v uzloch (Knot – kt). Rýchlosť veľkosti 1 uzol zodpovedá rýchlosti jednej námornej míle za hodinu. Veľkosť rýchlosti jedného uzlu v jednotkách km/h je vyjadrená v nasledovnej rovnici:

$$1 \text{ kt} = 1 \text{ NM/h} = 1,852 \text{ km/h} \quad (2)$$

Používané rýchlosti:

- **IAS - Indikovaná vzdušná rýchlosť (ang. Indicated airspeed)** – rýchlosť, ktorá je zobrazovaná na rýchlomere lietadla. Označovaná tiež KIAS, čo vyjadruje, že je uvádzaná v uzloch (Knots-Indicated airspeed). Môže byť vyjadrená aj v km/h, ale v leteckej praxi táto jednotka nie je veľmi využívaná. Táto rýchlosť je meraná pitot-statickým systémom, na základe tlakov v pitot-statickej trubici (umiestnenej zväčša na krídle alebo prednej časti lietadla, z dôvodu maximálnej izolácie od vzduchu obtekajúceho plášť letúnu).
- **CAS - Kalibrovaná vzdušná rýchlosť (ang. Calibrated airspeed)** – indikovaná rýchlosť, ktorá je opravená chybu plynúcu z umiestnenia pitot-statickej trubice na lietadle. Taktiež môže byť do jej označenia pridané písmeno K (KCAS – Knots-Calibrated airspeed), značiace vyjadrenie v uzloch.
- **EAS – Ekvivalentná vzdušná rýchlosť (ang. Equivalent airspeed)** – kalibrovaná rýchlosť zahrnujúca vplyv stlačiteľnosti vzduchu. Opäť môže byť označená ako KEAS (Knots-Equivalent airspeed), v prípade, že je udávaná v uzloch.
- **TAS - Skutočná vzdušná rýchlosť (ang. True airspeed)** – je rýchlosť, ktorou sa lietadlo pohybuje vzhľadom na prúdenie okolitého vzduchu. Ak je vyjadrená v uzloch, môže byť označená ako KTAS (Knots-True airspeed). Je to v podstate IAS zohľadňujúca polohu pitot-statickej trubice (CAS), stlačiteľnosť vzduchu (EAS) a výšku (jej vplyv na tlak/hustotu vzduchu), v ktorej sa lietadlo nachádza. Keďže vzduch je s rastúcou výškou redší, v nenulovej výške je TAS vždy väčšia ako IAS, ktorá nezohľadňuje faktor výšky.
- **GS – Traťová rýchlosť (ang. Ground speed)** – je skutočná vzdušná rýchlosť upravená o vplyv vetra na rýchlosť lietadla. Predstavuje rýchlosť letúnu vzhľadom na zemský povrch.
- **M – Mach** – skutočná vzdušná rýchlosť vyjadrená v pomere k rýchlosti zvuku. 1 Mach znamená rýchlosť zvuku.

$$M = \text{TAS}/a \quad (3)$$

kde a je rýchlosť zvuku a jej veľkosť je

$$a = 1 \text{ Mach} \approx 600 \text{ kt} \quad (4)$$

Výška:

Časť čerpá informácie z: [13].

V letectve je používaných aj viacero veličín, označovaných ako výška. Ich spoločnou jednotkou je stopa (ang. Foot – ft).

Rozlišujeme medzi:

- **Nadmorská výška (ang. Altitude – ALT)** – vyjadruje vertikálnu vzdialenosť bodu, telesa alebo hladiny od strednej hladiny mora (ang. Mean Sea Level – MSL). Jej základnou jednotkou je m.n.m. (meter nad morom), ale v letectve sa využíva skôr jednotka stopa. Je meraná výškomerom nastaveným na atmosférický tlak prepočítaný na hladinu mora (QNH).
- **Výška nad zemou (ang. Above Ground Level – AGL)** – vzdialenosť od úrovne terénu. Jeden zo spôsobov jej merania je pomocou GPS.
- **Výška nad letiskom (ang. Above Aerodrome Level – AAL)** – výška meraná výškomerom s tlakom nastaveným na tlak QFE, čo je tlak daného letiska.
- **Letová hladina (ang. Flight Level – FL)** – hladina stáleho atmosférického tlaku (izobarická hladina). Využíva sa vo väčších výškach kedy údaj o nadmorskej výške už nie je tak presný a mohol by zapríčiniť nehodu. Na výškomery sa nastaví štandardný tlak 1013,2 hPa (QNE) a zvolí sa vybraná letová hladina udaná v stovkách stôp, napr. FL100 (10 000 ft). Keďže však tlak nie je na každom mieste ani v rovnakej výške vždy rovnaký, tak aj letová hladina nie je vodorovná, ale môže klesať alebo stúpať v závislosti na tlaku, a tak má v rôznych miestach rôznu nadmorskú výšku.

Vertikálna rýchlosť:

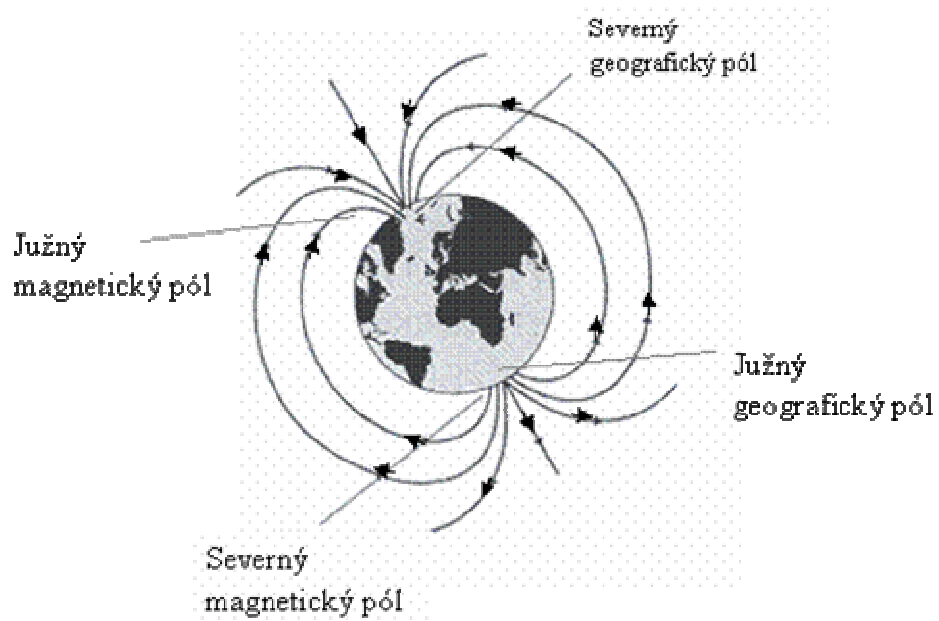
Vyjadruje rýchlosť stúpania resp. klesania a vyjadrená býva v stopách za minútu (ft/min). Kladných hodnôt nadobúda pri stúpaní. Pre názornosť uvádzame, že vertikálna rýchlosť 1000 ft/min zodpovedá približne stúpaniu 5 m/s.

Kurz:

Kurz je letovou veličinou určujúcou smer letu. Jej jednotkou je 1° (stupeň). V leteckej praxi sa pracuje s dvoma typmi letového kurzu. Spomínanými kurzami sú tieto:

- **Magnetický kurz (ang. Magnetic Heading – HDG)** – určuje smer letúnu relatívny k južnému magnetickému pólu Zeme. Určený môže byť jednoducho kompasom – strelkou, ktorá k nemu smeruje.
- **Zemepisný kurz (ang. True Track – TRK)** – predstavuje smer vzťahujúci sa k smeru k severnému geografickému pólu. Z dôvodu neustále sa meniaceho magnetického poľa Zeme, s čím súvisí zmena polohy magnetických pólov Zeme, je vyžadovaná existencia stabilného vzťažného systému pre určenie kurzu, ktorým zemepisný kurz bezpochyby je.

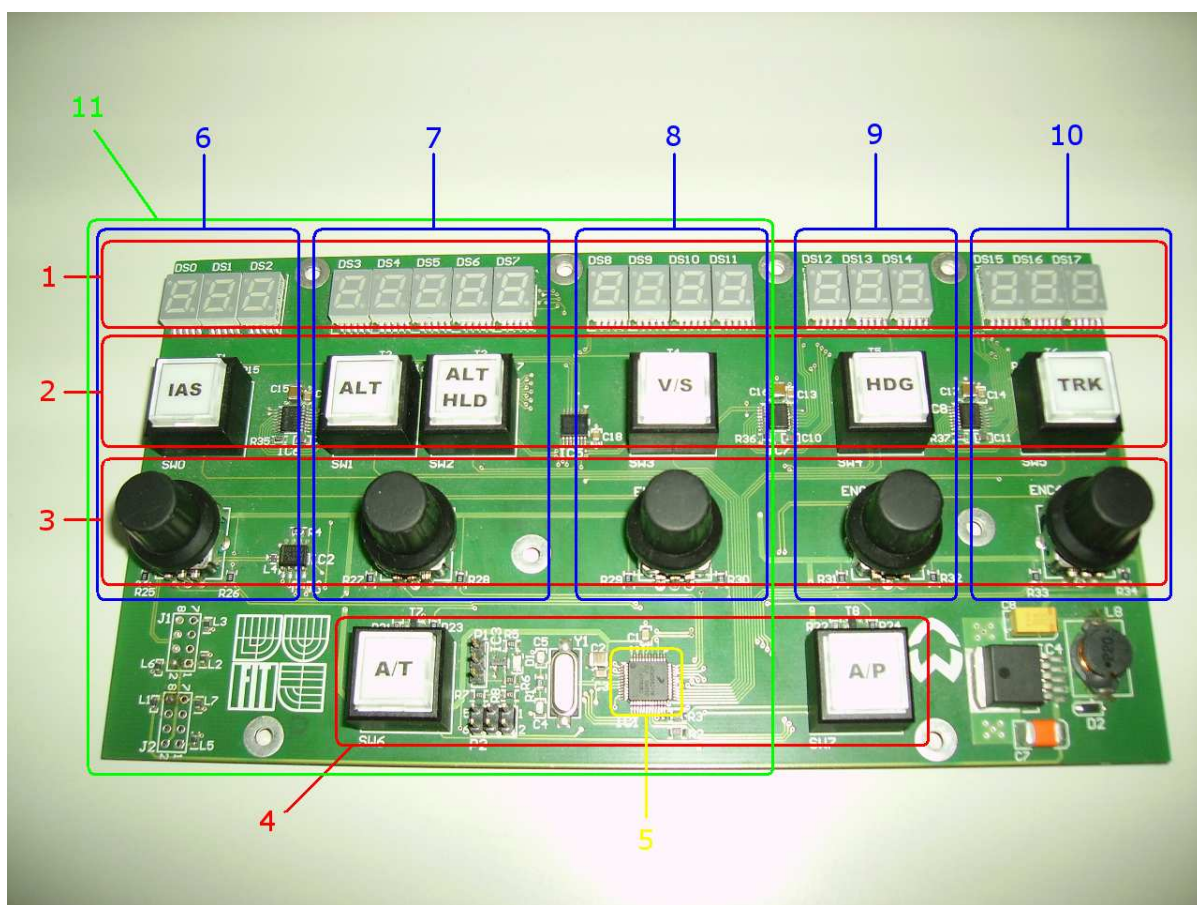
Rozdielnú polohu zemepisných a magnetických pólov Zeme znázorňuje *Obrázok 11*.



Obrázok 11: Vzájomná poloha geografických a magnetických pólov Zeme (prevzaté z [14])

5 Zadávací panel

Zadávací panel s implementovanou riadiacou logikou obsahuje mikrokontrolér rodiny MC9S08, 7-segmentové displeje, podsvietené tlačidlá, enkodéry, sériové vstupno-výstupné rozhranie a samozrejme ďalšie elektronické súčiastky potrebné k chodu panela (rezistory, diódy, atď.), ktoré však z pohľadu jeho funkcionality sú zanedbateľné. Panel je navrhnutý tak, aby umožňoval zadávanie piatich základných letových veličín, potrebných pre plnohodnotné automatické riadenie letu. Medzi ne patrí indikovaná vzdušná rýchlosť (IAS), nadmorská výška (ALT), vertikálna rýchlosť (V/S), teda rýchlosť stúpania resp. klesania, a smer letu, nastavovaný buď ako magnetický (HDG) alebo ako zemepisný kurz (TRK). Rozloženie ovládacích prvkov letových veličín a ďalších riadiacich komponent systému na paneli je znázornené na *Obrázku 12*.



Obrázok 12: Zadávací panel systému autopilota s vyznačenými hlavnými ovládacími prvkami

Vysvetlivky:

- 1** – skupiny 7-segmentových displejov
- 2** – LED podsvietené tlačidlá pre jednotlivé zadávané veličiny
- 3** – enkodéry pre jednotlivé zadávané veličiny
- 4** – hlavné riadiace tlačidlá systému
- 5** – riadiaca jednotka – mikrokontrolér MC9S08DV16CLF
- 6** – ovládacie a zobrazovacie prvky pre indikovanú vzdušnú rýchlosť
- 7** – ovládacie a zobrazovacie prvky pre nadmorskú výšku
- 8** – ovládacie a zobrazovacie prvky pre vertikálnu rýchlosť

9 – ovládacie a zobrazovacie prvky pre magnetický kurz

10 – ovládacie a zobrazovacie prvky pre zemepisný kurz

11 – časť autopilota súvisiaca s reguláciou ťahu motora - označená ako AutoThrust

Ako zobrazovacia jednotka slúži 5 skupín digitálnych displejov (**1**) – pre každú letovú veličinu jedna skupina. Počet displejov v skupine závisí od rozsahov jednotlivých veličín, v ktorých sa pohybujú vzhľadom na možnosti malého športového lietadla SportStar MAX. Na potvrdzovanie a rušenie už potvrdených nastavených hodnôt slúžia tlačidlá (**2**). Výnimku tvorí tlačidlo ALT HLD, ktoré nie je určené na potvrdenie nastavenej veličiny. Toto tlačidlo slúži na držanie aktuálnej výšky. Po jeho stlačení by sa mala načítať aktuálna výška do systému autopilota a zobrazit' na príslušnej skupine displejov, určenej pre veličinu nadmorská výška. Na nastavovanie jednotlivých hodnôt slúžia enkodéry (**3**). Pre každú veličinu je na paneli práve jeden enkodér. Na spodnej časti panela sa nachádzajú hlavné riadiace tlačidlá systému (**4**). Sú nimi tlačidlá označené ako A/T a A/P. A/T – tlačidlo AutoThrust zoskupujúce tlačidlá využívajúce funkciu regulácie ťahu motora (autothrust). Sú nimi indikovaná rýchlosť, nadmorská výška a vertikálna rýchlosť. Táto skupina ovládacích prvkov je na *Obrázku 12* označená číslom **11**. Tlačidlo A/P (AutoPilot) slúži ako spúšťacie a ukončovacie tlačidlo systému autopilota. Ako riadiaca jednotka slúži mikrokontrolér MC9S08DV16CLF (**5**), ktorý je naprogramovaný aplikáciou pre systém autopilota, a tak ovláda všetky prvky panela. Číslom **6** je na paneli označená skupina ovládacích prvkov, slúžiaca pre nastavovanie hodnôt indikovanej vzdušnej rýchlosti. Číslom **7** sú označené ovládacie prvky pre nadmorskú výšku, vrátane tlačidla ALT HLD, slúžiaceho na nastavenie režimu udržiavania aktuálnej výšky letúnu. Pod číslom **8** sa skrýva veličina vertikálna rýchlosť. Pod číslom **9** magnetický kurz, a ovládacie prvky panela pre zemepisný kurz sú označené číslom **10**.

Jednotlivé ovládacie prvky sú na paneli rozložené tak, aby bola zabezpečená čo najlepšia viditeľnosť zobrazovacích prvkov, dostupnosť prvkov slúžiacich na manipuláciu s nastavovanými hodnotami jednotlivých veličín a intuitívne zoskupenie prvkov podľa jednotlivých veličín. Týmto kritériám zodpovedá umiestnenie segmentových displejov na vrchnej časti riadiaceho panela. Hneď pod skupinami displejov sú umiestnené podsvietené tlačidlá, ktorú taktiež plnia zobrazovaciu funkciu. Tá spočíva v rozsvietení v prípade aktivácie. Pod tlačidlami LED sa nachádzajú príslušné enkodéry, ktoré takto dotvárajú každú zo skupín ovládacích prvkov pre nastavovanie jednotlivých veličín. Hlavné riadiace tlačidlá sú umiestnené na spodnej časti kontrolného panela, svojou pozíciou a usporiadaním zreteľne odlíšené od nastavovacej časti.

6 Popis vlastného riešenia

6.1 Nastaviteľné veličiny

Kapitola vychádza z: [15].

Výsledná aplikácia umožňuje nastavovanie piatich vstupných veličín potrebných pre plnohodnotné automatické riadenie letu. Hoci niektoré z týchto veličín majú v praxi používané mierne odlišné skratky, napr. KIAS, na zadávacom paneli sú všetky, z praktických dôvodov (s ohľadom na rozmery tlačidiel), označované trojpísmenovými skratkami. Výnimku tvorí iba tlačidlo ALT HLD, ktorého názov je dvakrát dlhší z dôvodu jednoznačného odlíšenia od tlačidla ALT.

Prvou veličinou na paneli je indikovaná vzdušná rýchlosť, označená ako IAS. Ako bolo vyššie spomenuté, jedná sa o rýchlosť zobrazovanú na rýchlomere lietadla bez korektúr vplyvu stlačiteľnosti vzduchu a pod. Táto rýchlosť je na displejoch zobrazovaná v jednotkách uzloch – knotoch. Pre indikovanú rýchlosť boli bezpečnostné kritéria nastaviteľných hodnôt odvodzované od rýchlostnej charakteristiky lietadla SportStar MAX od firmy Evector. Táto charakteristika lietadla je znázornená na *Obrázku 13*, spolu s vyznačenými najpodstatnejšími hraničnými hodnotami rýchlosti letúnu. V tabuľke sú vyznačené (červenou elipsou) štyri hodnoty indikovanej rýchlosti. VS0 – pádová rýchlosť pri vzletovej konfigurácii letúnu. VS1 – pádová rýchlosť v čistej konfigurácii. VFE – maximálna rýchlosť s vysunutými klapkami. VNO – maximálna konštrukčná cestovná rýchlosť. Počiatočná hodnota indikovanej rýchlosti, zobrazená na paneli pri jeho aktivácii, je nastavená na 80 uzlov. Táto hodnota bola zvolená z dôvodu minimálnej a maximálnej rýchlosti nastaviteľnej v systéme riadiacej logiky autopilota (VS0 a VNO na *Obrázku 13*). Nachádza sa približne v dvoch tretinách intervalu medzi minimálnou a maximálnou nastaviteľnou hodnotou (upravenými o bezpečnostnú hranicu, viď ďalej) - bližšie k (používanějšíemu) maximu. Minimálna možná rýchlosť nastaviteľná na zadávacom paneli je 40 uzlov pri vzletovej a 45 uzlov v čistej konfigurácii. Maximálna rýchlosť je pri vzletovej konfigurácii obmedzená hodnotou rýchlosti 65 uzlov tak, ako odporúča prevádzková príručka nami zvoleného letúnu[15]. V čistej konfigurácii je možné nastaviť rýchlosť až na hodnotu doporučenej maximálnej prevádzkovej rýchlosti v horizontálnom lete, teda 105 uzlov. Vzhľadom na nelinearity vychádzajúce z povahy elektromechanických aktuátorov bolo na základe expertnej znalosti pristúpené k vytvoreniu 10 percentnej bezpečnostnej hranice nastaviteľných hodnôt rýchlosti pre minimálne a maximálne prevádzkové režimy. Z hľadiska efektívnosti systému autopilota, je zbytočné umožňovať nastavovanie rýchlosti po jednotkách uzlov, preto bol na základe praktických poznatkov vytvorený inkrement, o ktorý sa indikovaná rýchlosť bude pri nastavovaní meniť smerom nahor alebo nadol. Veľkosť inkrementu/kroku pri nastavovaní indikovanej rýchlosti je 5 uzlov.

		RETRACTED 0°	TAKEOFF 15°	LANDING I 30°	LANDING II 50°
	KIAS	KCAS	KCAS	KCAS	KCAS
VS0	37		43	42	42
VS1	38	45	44	43	42
	39	46	44	44	43
	40	47	45	45	44
	41	48	46	46	45
	42	48	47	47	46
	43	49	48	48	47
	44	50	49	48	48
	45	51	50	49	48
	50	55	54	53	53
	55	59	58	58	57
	60	63	62	62	62
	65	67	67	66	66
VFE	70	71	71	70	70
	75	75			
	80	80			
	85	84			
VA	90	89			
	95	93			
	100	98			
	105	103			
	110	107			
VNO	115	112			
	120	117			
	125	122			
	130	127			
	135	132			
	140	138			
VNE	146	144			

Obrázok 13: Rýchlostná charakteristika malého športového lietadla Evektor EV-97 SportStar MAX, zobrazeného na *Obrázku 10*

Ďalšou nastaviteľnou veličinou je nadmorská výška (ALT) udávaná v stopách. Počiatočná hodnota výšky je nastavená na 2000 stôp. Minimálna nastaviteľná hodnota je, vzhľadom na bezpečnosť letovej prevádzky, 1000ft AMSL („above mean sea level“ - nad strednou hladinou mora) a maximálna 10 000 stôp. S dôrazom na efektívnosť zadávacieho panela, došlo k vytvoreniu inkrementu nastavovania aj pri nadmorskej výške. Jeho hodnota bola stanovená na 100 stôp.

Tretia veličina je vertikálna rýchlosť (V/S). Počiatočná hodnota je nastavená na nulu. Vzhľadom na dynamiku lietajúceho systému bola minimálna hodnota obmedzená úrovňou -900 ft/min. Maximálna vstupná hodnota vertikálnej rýchlosti bola na základe podobných kritérií obmedzená na +900 ft/min. Vertikálna rýchlosť je poslednou veličinou, u ktorej došlo k vytvoreniu špeciálnej hod-

noty inkrementu nastavovania. Krok nastavenia zohľadňuje bežnú prevádzkovú prax a má hodnotu 100 ft/min.

Zvyšné navigačné veličiny, magnetický kurz (HDG) a zemepisný kurz (TRK), majú počiatočnú hodnotu nulovú. Sú udávané v stupňoch a ich rozsah je $0^\circ - 359^\circ$. Inkrement u oboch veličín je 1° , nakoľko v leteckej praxi je využívané presné zadávanie kurzu na jednotky stupňov.

6.2 Spustenie a ovládanie

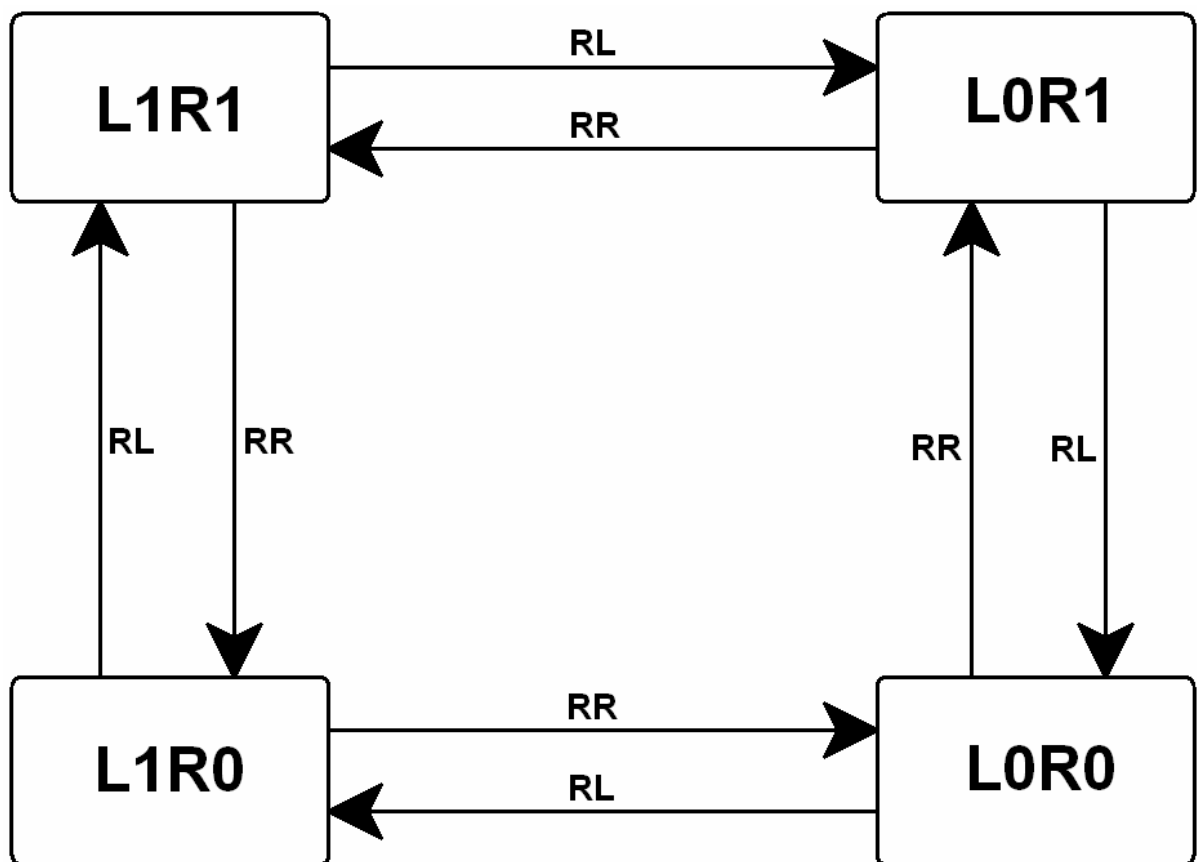
Po aktivácii zadávacieho panela, nastane rozsvietenie displejov s počiatočnými systémovými hodnotami, ktoré je následne možné upravovať. Na *Obrázku 14* je zobrazený aktivovaný zadávací panel v jednom zo základných štádií vývinu softwarovej aplikácie. Je na ňom možno vidieť napríklad súčasné spustenie veličín ALT a V/S, z ktorého bolo z dôvodu zabezpečenia jednoznačnosti zobrazovania aktívnych veličín upustené. Ďalšou funkcionalitou, ktorú možno badať na *Obrázku 14*, ktorá sa už vo výslednej aplikácii nenachádza, je zobrazovanie „prebytočných“ núl pred číslom. Toto zobrazovanie je chaotické a môže viesť ku špatnej interpretácii zobrazených dát. Vo výslednej aplikácii je teda 0 zobrazovaná len ako jedna nula a nie postupnosť viacerých núl. Taktiež zobrazené číslo ak svojou dĺžkou nevyplní všetky displeje príslušnej skupiny displejov, tak displeje pred zobrazeným číslom sú vypnuté.



Obrázok 14: Ukážka funkcionality panela so základnou funkčnosťou

Jednotlivé parametre sú zadávané pomocou piatich enkodérov. Nastavované hodnoty sú zobrazované v jednotlivých skupinách displejov príslušných letových veličín. Enkodér pri rotácii vracia dve hodnoty určujúce smer otáčania, ktoré sú postupne modifikované. V základnej polohe enkodér vracia obe hodnoty úrovne logickej 1. Pri rotácii je najskôr jedna z hodnôt (v závislosti od smeru

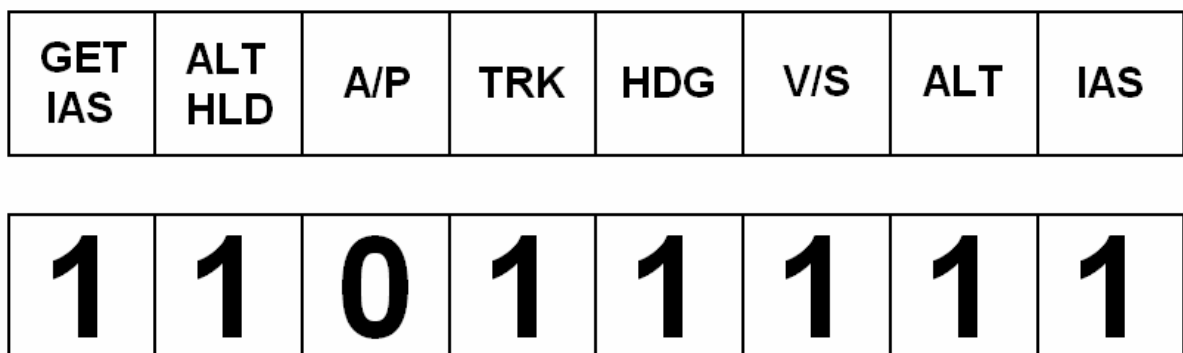
otáčania) zmenená na hodnotu logickej nuly, potom druhá. Následne (pri ustavičnej rotácii) je prvá zmenená hodnota nastavená naspäť do hodnoty logickej 1, a potom aj druhá. Tento stav otočenia enkodéru do základnej polohy - vrátenie oboch signálov do počiatočného stavu - vyvolá reakciu displeja - pripočítanie/odpočítanie veľkosti inkrementu príslušnej letovej veličiny. Celý proces zisťovania otáčania, je v softwarovej aplikácii riešený na princípe konečného stavového automatu. Z hľadiska implementácie sú stavy automatu obrazom dvoch pomocných premenných, ktoré odrážajú stav dvoch hodnôt enkodéru. Na *Obrázku 15* je zobrazené riešenie konečného automatu. Jednotlivé stavy sú označené ako LxRx, kde L symbolizuje identifikátor prvej hodnoty (pri otáčaní doľava je modifikovaná ako prvá) a následné x konkrétnu hodnotu. R symbolizuje identifikátor druhej hodnoty (pri rotácii doprava je modifikovaná ako prvá) a následné x opäť konkrétnu hodnotu. Štartovacím stavom je stav označený ako L1R1. RL znamená rotáciu vľavo a RR znamená rotáciu enkodéru vpravo.



Obrázok 15: Konečný stavový automat riadiaci činnosť enkodérov

Tlačidlá IAS, ALT, V/S, TRK a HDG slúžia na potvrdenie novej, prípadne zrušenie potvrdennej hodnoty. Pri potvrdení hodnoty sa táto hodnota spolu s ostatnými nastavenými hodnotami odošle cez sériovú linku do simulátoru a tam vyvolá zmenu nastavenej hodnoty príslušnej veličiny. Pri zrušení hodnoty sú do simulátoru odoslané údaje o stále aktívnych veličinách. Zoznam aktívnych veličín je riešený pomocou jedného Bytu s označením **msg**, v ktorom každý bit obsahuje informáciu o aktivite jednej z veličín (bity **TRK** – **IAS**) alebo informáciu o tom, či je spustené automatické riadenie letu (bit **A/P**). Taktiež obsahuje 2 bity reprezentujúce žiadosť o získanie aktuálnej výšky (**ALT HLD**) alebo rýchlosti (**GET IAS**) zo simulátoru. Jednotlivé bity sú pomenované podľa príslušných tlačidiel zadávacieho panela, okrem bitu č. 7, ktorý odpovedá akcii spustenia systému autopilota bez predchádzajúceho zadania hodnoty IAS (viď ďalej v tejto sekcii pri popise funkcie tlačidla A/P). Celé rieše-

nie tohto Bytu je znázornené v prvej časti *Obrázku 16* (MSB (ang. Most Significant Bit – najvýznamnejší bit) je vľavo). V druhej časti *Obrázku 16* je vidieť štruktúru bytu, nesúceho informáciu o vypnutí autopilota. Táto informácia má hodnotu DF v hexadecimálnom formáte čísla. Hodnota bola zvolená takto, aby sa predišlo konfliktným situáciám, kedy by jedna konfigurácia bytu mala dve rozličné interpretácie. Túto kombináciu bitov je však nemožné dosiahnuť inou cestou, ako explicitným nastavením, nakoľko nemôžu byť naraz nastavené do hodnoty logickej 1 bity **V/S** a **ALT**, **HDG** a **TRK**, alebo **GET IAS** a **ALT HLD** (vyplýva to z možností nastavenia autopilota, kedy nemôžu byť nastavené niektoré dvojice veličín súčasne, viď túto kapitolu nižšie). Ak dôjde k vypnutiu systému, je táto informácia (správa s hodnotou DFh) odoslaná do simulátoru. V prípade zmeny v nastavení systému autopilota je kompletný stav systému (aktivita autopilota, spolu s nastavenými hodnotami) odoslaný do simulátoru. Najskôr je do simulátoru odoslaný Byte msg a následne hodnoty nastavených veličín v poradí, v akom sú usporiadané v msg Byte v smere od LSB (ang. Least Significant Bit – najmenej dôležitý bit – bit č. 0), teda najskôr IAS, potom ALT, V/S, HDG a TRK.



Obrázok 16: Byte msg - štruktúra rozloženia jednotlivých bitov a príklad správy znamenajúcej deaktiváciu automatického riadenia letu

Tlačidlo ALT HLD (altitude hold) nastaví režim držania aktuálnej výšky. V prípade jeho stlačenia je do simulátoru zaslaná žiadosť o získanie aktuálnej hodnoty nadmorskej výšky, v ktorej sa lietadlo nachádza. Prijatá hodnota je následne spracovaná a zobrazená na displeji výšky.

Druhá situácia, kedy je nutné žiadať o aktuálnu hodnotu jednej z letových veličín je, keď dôjde k spusteniu autopilota bez toho, že by bola nastavená nejaká hodnota rýchlosti. IAS musí byť zapnutá vždy, keď je spustený systém riadenia letu, nakoľko systém pre manévrovanie vyžaduje nastavenú rýchlosť. Z tohto dôvodu taktiež nie je možné vypnúť IAS počas spusteného automatického riadenia. Po odoslaní požiadavku o aktuálnu rýchlosť letúnu sa čaká na túto informáciu. Po jej prijatí je táto zobrazená na displeji indikovanej rýchlosti a letún poletí podľa zadaných kritérií autopilota aktuálnou rýchlosťou.

Zo simulátoru každých 0,5 s prichádza informácia o konfigurácii letúnu – teda o polohe klapiek. Konfigurácia letúnu má vplyv na rýchlosť, akou sa môže pohybovať. Z *Obrázku 13* (po započítaní bezpečnostného obmedzenia nastavovania) vyplýva nasledovné: v prípade čistej konfigurácie je povolené zadávanie hodnôt IAS v rozsahu 45 kt – 105 kt; v prípade vysunutých klapiek je zadávanie obmedzené na hodnoty od 40 kt do 65 kt.

Tlačidlo A/T (autothrust) potvrdí alebo zruší nastavenie hodnôt IAS, ALT a V/S. V prípade, že je zapnutý systém automatického riadenia letu, tlačidlo A/T ho vypne spolu so všetkými nastavenými hodnotami vstupných parametrov systému.

Tlačidlo A/P (autopilot) slúži na zapnutie a vypnutie systému autopilota. Pri jeho vypnutí sú zrušené všetky nastavené hodnoty.

Pri spustenom automatickom riadení letu nemôžu byť niektoré z letových veličín zapnuté súčasne, nakoľko by sa navzájom ovplyvňovali. Z parametrov systému ALT, ALT HLD a V/S môže byť v jednom momente zapnutý maximálne jeden. Pri manipulácii (potvrdenie, zrušenie alebo zmena hodnoty) s jedným z týchto parametrov dôjde k vypnutiu signalizácie aktivity u ostatných (ak sú aktuálne aktívne). Taktiež z parametrov TRK a HDG môže byť v jednom momente zapnutý nanajvyš jeden a v prípade manipulácie s jedným z nich, je signalizácia aktivity druhého dočasne vypnutá.

Pri zmene niektorej z hodnôt, ktorá mala za následok zhasnutie niektorého z tlačidiel sa spustí časovač. Pri sústavnej zmene hodnôt ľubovoľnej veličiny je časovač nulovaný. Nie je však zastavený. K zastaveniu časovača dôjde až pri stlačení niektorého z tlačidiel. Pri tejto akcii sa časovač zastaví a vynuluje. Všetky nepotvrdené hodnoty sú zmenené na hodnoty pred manipuláciou. Ak bola potvrdená nejaká hodnota, tak došlo k vypnutiu veličiny, ak bola práve aktívna, ktorá by nemohla byť zapnutá spolu s novo nastavenou veličinou. Ostatné parametre, na ktoré nemalo vo výsledku nastavenie žiadny vplyv (ich hodnoty a stav sa vplyvom nového nastavenia nemuseli meniť) majú rovnaký stav ako pred začiatkom zmeny nastavenia. Ak by v priebehu zmeny hodnôt došlo skôr k vypršaniu času, ako k potvrdeniu nejakej zmeny, vrátia sa všetky nastavenia do stavu pred počiatkom zmeny nastavenia. Časovač je implementovaný ako počítač prázdnych cyklov. Jeho vypršanie je nastavené na cca 2 sekundy.

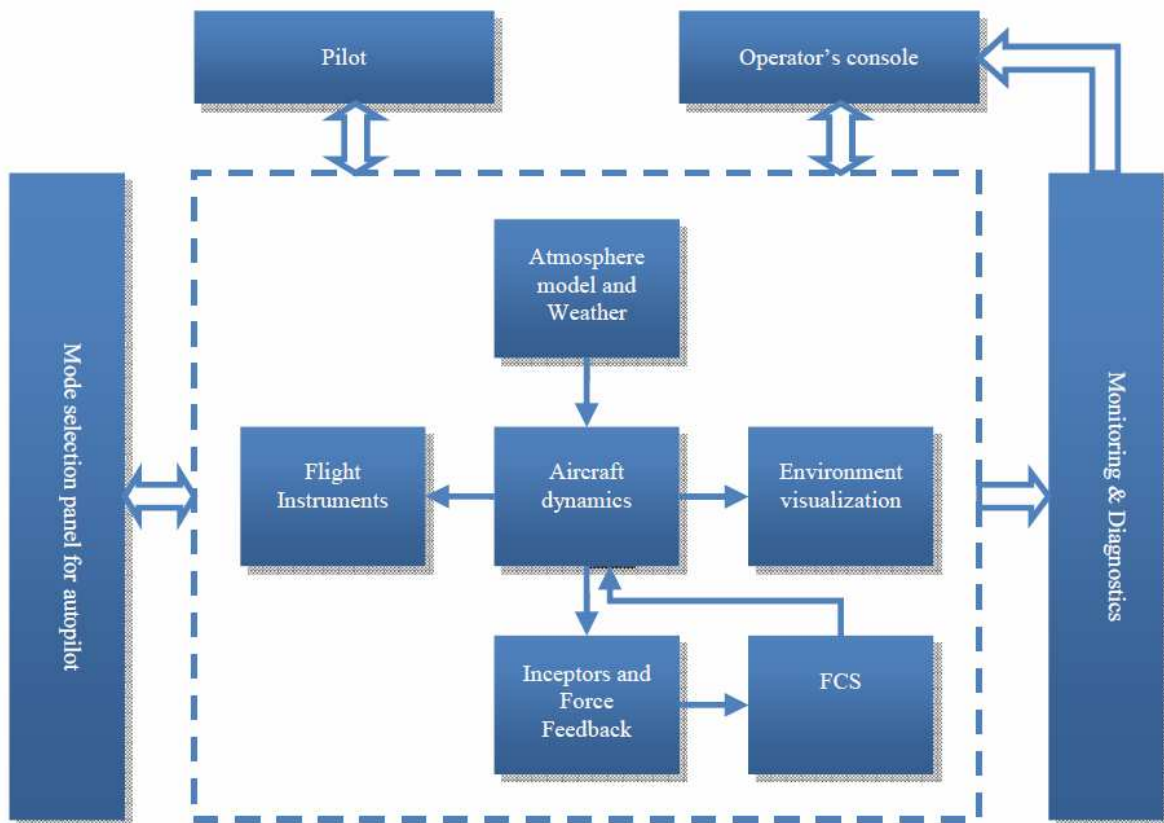
7 Testovanie

7.1 Letecký simulátor SimStar

Aktuálne riešenie zadávacieho panela pre systém autopilota bolo integrované do simulátoru malého športového lietadla SimStar, situovaného v priestoroch Fakulty Informačných Technológií, ktorý je k videniu na *Obrázku 17*. SimStar je leteckým simulátorom postaveným na základe ultralightového lietadla Evektor EV-97 SportStar MAX, zobrazeného na *Obrázku 10*. Schéma integrácie zadávacieho panela do komplexného simulačného systému je vyobrazená na *Obrázku 18*.



Obrázok 17: SimStar – simulátor malého športového lietadla SportStar MAX (prevzaté z [16])



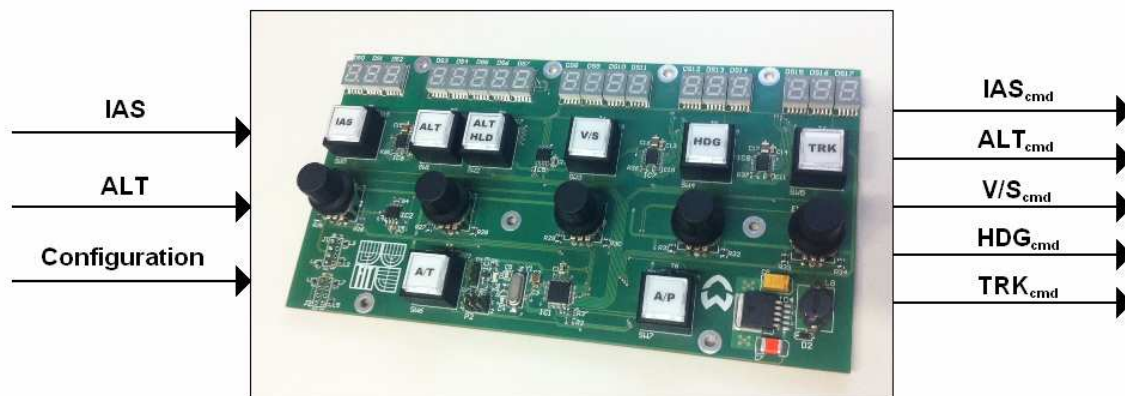
Obrázok 18: Schéma zapojenia a interakcie medzi komponentmi simulátoru (prevzaté z [17])

7.2 Komunikačný protokol

Sekcia vychádza z: [18].

Kontrolný panel s riadiacou logikou simulátoru komunikuje cez sériovú linku pomocou komunikačného protokolu AW-COM, popísaného v [18]. Protokol pracuje na princípe klient-server. Zadávací panel vo forme klienta posiela dotazy na server. V protokole sú definované dve základné metódy: metóda SET, slúžiaca na odoslanie nastavených parametrov na zadávacom paneli, a metóda GET, slúžiaca na získanie informácií o aktuálnej rýchlosti, výške a konfigurácii letúnu zo simulátoru. Metódou SET je možné nastaviť všetky parametre riadiaceho systému naraz. Metódou GET je naopak možné získať všetky potrebné informácie o aktuálnej výške, rýchlosti, konfigurácii letúnu, ale aj o aktuálnom (poslednom potvrdenom) nastavení parametrov autopilota, napr. pre kontrolu. Dôležitou vlastnosťou protokolu je, že prijímané aj odosielané dáta sú v metrických jednotkách, teda v metroch (ALT) alebo metroch za sekundu (IAS, V/S), takže všetky údaje so simulátoru a aj zo zadávacieho panela musia byť prepočítané podľa rôznych konštánt do správnych jednotiek. Údaj o vysunutí klapiek je udávaný v percentách.

Na Obrázku 19 sú znázornené vstupy a výstupy kontrolného panela. Na vstup panela sú privedené aktuálne údaje o rýchlosti a výške, a taktiež o aktuálnej letovej konfigurácii. Tieto informácie sú získavané metódou GET komunikačného protokolu AW-COM. Na výstup sú vyvedené všetky nastavené veličiny. Hodnoty týchto veličín sú odosielané na server pomocou metódy SET.



Obrázok 19: Blokové schéma so znázornenými vstupnými a výstupnými parametrami

Ako bolo vyššie spomenuté, komunikácia so serverom je realizovaná pomocou sériovej linky. Na túto komunikáciu boli použité dva piny mikrokontroléru (ďalej len MCU), určené na sériovú komunikáciu: TxD1 a RxD1. (Tx = transceiver, vysielač; Rx = receiver, prijímač) Tieto dva piny, ako aj celá sériová komunikácia, sú v MCU riadené pomocou ôsmich registrov: 2 registre riadia frekvenciu sériovej linky, ktorá bola nastavená na 1 500 MHz; 3 kontrolné registre sériovej linky; 2 status registre, nesúce informácie o stave linky prevažne v podobe flagov a 1 dátový register, do ktorého sú odosielané dáta zapisované a z ktorého sú prijaté dáta čítané. Príjem správy je reprezentovaný nastavením RDRF (Receive Data Register Full Flag) bitu v status registri číslo 1 na hodnotu 1. Po prečítaní hodnoty tohto registru je možné prejsť k prečítaniu prijatej správy z dátového registra. Odoslanie správy je podmienené nastavením bitov TDRE (Transmission Data Register Empty Flag) a TC (Transmission Complete Flag) v status registri číslo 1. Ak sú obidva tieto registre nastavené na hodnotu logickej 1, môže byť správa zapísaná do dátového registra a následne bude odoslaná.

8 Záver

Na hardwarovej platforme bola implementovaná aplikácia, umožňujúca nastavovanie letových režimov autopilota pre nižšiu kategóriu lietadiel všeobecného letectva. Vytvorený technologický demonštrátor bol implementovaný v experimentálnom leteckom simulátore SimStar, situovanom v priestoroch Fakulty Informačných Technológií v Brne.

Pri návrhu panela rozhrania autopilota bolo nutné dodržať bezpečnostné požiadavky kladené na funkčnosť a zabezpečiť čo najväčšiu efektívnosť. Za účelom eliminácie rizika spojeného s možnosťou nastavenia prevádzkových hodnôt, ktoré by mohli viesť k nehode, boli hraničné hodnoty rýchlostí priblížené k bezpečným prevádzkovým hodnotám približne o 10%. Minimálna hodnota výšky bola nastavená na 1000ft AMSL. Hraničné hodnoty vertikálnej rýchlosti boli obmedzené na +/- 900 ft/min.

Implementácia bola podrobená sérii testov, ktoré potvrdili vhodnosť rozmiestnenia jednotlivých ovládacích prvkov a funkčnosť softwarovej aplikácie pre zadávanie módu autopilota. Napriek blízkej vzdialenosti LED tlačidiel od segmentových displejov, sa tieto zobrazovacie prvky neobmedzovali a neprekážali v správnej interpretácii zobrazovaných dát. Jednotlivé ovládacie prvky sú na paneli rozložené tak, aby bola zabezpečená čo najlepšia viditeľnosť zobrazovacích prvkov, dostupnosť prvkov slúžiacich na manipuláciu s nastavovanými hodnotami jednotlivých veličín a intuitívne zoskupenie prvkov podľa jednotlivých veličín s dostatočnými vzdialenosťami medzi jednotlivými ovládacími prvkami. Pod tlačidlami LED sa nachádzajú príslušné enkodéry, ktorých poloha intuitívne vedie k potvrdeniu nastavenej hodnoty stlačením tlačidla. Hlavné riadiace tlačidlá sú umiestnené na spodnej časti kontrolného panela tak, aby sa ich funkcia neplietla s komponentmi pre nastavovanie jednotlivých veličín. Letecký simulátor bol schopný bez problémov riadiť lietadlo podľa zadávaných kritérií a správne reagovať na všetky rôzne vstupy zadávacieho panela. Systém bol podrobený aj záťažovým testom na softwarové chyby, ktoré by spôsobili haváriu. Testovanie na softwarovú chybu spočívalo v spustení systému na dlhú, vopred nestanovenú, dobu, počas ktorej bol systém neustále aktívny, a aj po ukončení tohto testovania bol schopný plnohodnotnej funkcionality. Táto doba sa v rámci viacerých testov pohybovala v rozmedzí od 30 minút do viac ako 2 hodín.

Vďaka potenciálu zadávacieho panela je možné hneď niekoľko rozšírení do budúcnosti. Panel má k dispozícii rozhranie pre protokol CANaerospace, na ktorého implementácii už boli začaté práce. Pre zrýchlenie procesu zadávania hodnôt (zvlášť u HDG a TRK je tento proces pomerne zdĺhavý) je možné implementovať dynamicky sa zväčšujúci inkrement hodnôt. S rýchlejšou rotáciou enkodérov by sa inkrement exponenciálne zväčšoval a v prípade pomalej rotácie by naopak mohol byť inkrement u všetkých veličín rovný jednej. Z hľadiska bezpečnosti by bolo ideálne prepojenie panela s GPS alebo systémom, spracovávajúcim digitálne mapy, a tak by panel umožňoval zadávanie hodnôt výšky nad zemským povrchom (nie nad morom), ktoré by boli pre potreby malého športového lietadla v miestnych podmienkach výhodnejšie.

Literatúra

- [1] American Institute of Aeronautics and Astronautics, Reston, Virginia, Recommended practice for atmospheric and space flight vehicle coordinate systems, 1992
- [2] WWW stránky: NASA – Education at Glenn. www.grc.nasa.gov.
- [3] WWW stránky: Souřadnicové soustavy používané v letectví.
http://www.slavetind.cz/stavba/Mechanika/Sour_soustavy.aspx.
- [4] Colonel William Scheck, Lawrence Sperry: Autopilot Inventor and Aviation Innovator. In: Aviation History, 2004
- [5] WWW stránky: LSearle_bombsight.pdf.
http://www.thevaluesell.com/images/LSearle_bombsight.pdf.
- [6] WWW stránky: How Autopilot Works.
<http://science.howstuffworks.com/transport/flight/modern/autopilot.htm>.
- [7] WWW stránky: Systémy automatického riadenia letu.
<http://www.avionika.leteckafakulta.sk/?q=node/37>.
- [8] WWW stránky: Popular Mechanics – Google Books. http://books.google.cz/books?id=UOIDAAAAMBAJ&pg=PA858&dq=Junkers+stratosphere&hl=en&ei=4KgNTb33B8S4ngeYq9WjDg&sa=X&oi=book_result&ct=result&redir_esc=y#v=onepage&q&f=true
- [9] WWW stránky: Photos: Airbus A380-861 Aircraft Pictures.
<http://www.airliners.net/photo/Emirates/Airbus-A380-861/2095843/L/&sid=c4382b9bc8671dc4ed5294210f215d62>.
- [10] WWW stránky: SportStar MAX – LSA aircraft for pilot training and comfort travel.
<http://www.evektoraircraft.com/en/aircraft/sportstar-max/gallery-100>.
- [11] WWW stránky: mach-as.pdf. <http://www.tscm.com/mach-as.pdf>.
- [12] WWW stránky: L5 Speeds – Česká divize IVAO.
http://ivaocz.virtualskies.net/Trenink/Treninkovy_balicek/ADC_PP/L5_speeds.html.
- [13] WWW stránky: P1.pdf. http://www.aeroklub-prievidza.sk/pics/asekcia_subory/P1.pdf.
- [14] WWW stránky: Magnetické pole Zeme.
<http://lisabon.blog.cz/0910/magneticke-pole-zeme>.
- [15] Evektor – Aerotechnik a.s., Kunovice, Aircraft operating instructions for SportStar MAX light sport aircraft, 2009.
- [16] WWW stránky: AeroWorks. <http://merlin.fit.vutbr.cz/AeroWorks/>.
- [17] Chudý, P., Rydlo, K.: Intuitive flight display for light aircraft. In: AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference, Portland, Oregon, 2011
- [18] Rydlo Karol: Vizualizace vzdušného prostoru ve 3D, Diplomová práce, Brno, MUNI-FI v Brně, 2012

Zoznam príloh

Príloha 1. DVD

Obsah DVD:

- xcibul08.pdf – textová časť bakalárskej práce
- projekt – zložka obsahujúca projekt pre vývojové prostredie Freescale CodeWarrior
- zdrojové texty – zložka obsahujúca zdrojové texty vyvíjanej aplikácie