



VÝVOJ PRÍSTROJOVÉHO VYBAVENIA LIETADIEL VŠEOBECNÉHO LETECTVA

Peregrína Uhríková
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Branislav Kandra
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Abstract

The bachelor's thesis is devoted to the development of general aviation aircraft instrumentation. It contains a detailed description of the principle of operation of individual elements of the analog instrument panel. The separate text is supplemented with pictorial material, where the structural part of the instrument elements is drawn in detail, thanks to which the reader can better understand the principle of work of the mentioned aircraft instruments. The next part of the work specifies the transition to digital instrument panels and it lists the advantages and disadvantages of the modern cockpit, as well as the reasons why general aircraft designers switch to the new instrument panel concept, the so-called glass cockpit. The elements of the digital instrument panel are characterized in the next part of the thesis, which describes individual types of display units – CRT, LCD and LED. It also deals with the individual elements that are found in digital instrument panels and also describes in more detail the MEMS technology that is the basis for the function of the modern cockpit concept. The bachelor's thesis also deals with the historical development of the layout of the instrument panel and familiarizes the reader with the difference in visualization of information on individual instrument panels. This part of the work is supplemented with visual material, through which it is possible to become better acquainted with the display of data on the traditional and modern type of cockpit. The aim of the work is to create study material for students of the field focused on air transport and an interactive presentation for familiarization with the basic control of the Dynon SkyView digital instrument panel.

The thesis also contains the methodology and methodology of the work, which defines what research methods were used in the thesis.

Keywords

Aviation instruments, Display units, Displays, Visualization, Instrument panel, Analog instrument panel, Digital instrument panel

1. Úvod

Prví letci sa museli spoliehať na svoje zmysly, keďže neexistovali žiadne letové prístroje. Postupne boli vynájdene letecké prístroje, ktoré slúžili pre pomoc pilotovi. Hoci boli podľa dnešných štandardov veľmi primitívne, mnohé prvé prístroje sa ukázali ako adekvátne pre „malé a pomalé“ lietadlá.

Letecké prístroje sú klasifikované buď z hľadiska ich použitia, alebo z hľadiska princípu, ktorý je základom ich činnosti alebo konštrukcie. V bakalárskej práci sme klasifikovali prístroje podľa princípu činnosti na tri hlavné skupiny – mechanické (vrátane gyroskopických) prístroje, tlakové prístroje a elektrické prístroje. Práca disponuje stručným popisom leteckých prístrojov a je doplnená obrazovým materiálom. [51]

V prvej kapitole práce je podrobne rozobratá konštrukcia a princíp činnosti snímačov tlaku a leteckých prístrojov analógového prístrojového panelu. Zameriava sa na jednotlivé prístroje analógového prístrojového panelu z hľadiska ich konštrukcie a princípu činnosti. V kapitole sú bližšie špecifikované aerometrické a gyroskopické prístroje a magnetický kompas, ktoré sú doplnené o obrazový materiál.

Druhá kapitola opisuje prechod na digitálne prístrojové panely, a zároveň sú v nej uvedené výhody aj nevýhody moderného kokpitu. Výhodami sú situačné povedomie, spoľahlivosť, presné indikácie a zníženie pracovného zaťaženia pilota. Medzi nevýhody patrí vysoká cena a obavy o bezpečnosť. Digitálny prístrojový panel sa neodporúča pre počítačový letecký výcvik, nakoľko moderný kokpit zvyčajne rozptyľuje študenta a navádza ho pozrieť sa do pilotnej kabíny, čo môže mať za následok, že sa študenti nikdy nenaučia ovládať lietadlo s analógovým prístrojovým panelom alebo elektrickou poruchou.

Digitálny prístrojový panel a jeho prvky z hľadiska konštrukcie a princípu činnosti jednotlivých prvkov definujeme v tretej kapitole. Základom digitálneho prístrojového panelu je EFIS (elektronický systém leteckých prístrojov). V podkapitolách sú popísané rôzne typy displejov (CRT, LCD, LED) a základné prístrojové komponenty (ADC, RLG, MEMS technológia, systémy diaľkového kompasu, magnetometer, AHRS).

Štvrtá kapitola práce poskytuje prehľad vizualizácie informácií na prístrojovom paneli – umiestnenie primárnych letových prístrojov v starších aj v súčasnej dobe používaných letúnoch, ich usporiadanie na prístrojovom paneli v rôznych druhoch letúnoch. Výhody a nevýhody jednotlivých prístrojov so zameraním na ich využitie ako v starších, tak aj v nových druhoch či verziách letúnoch. Jednotlivé časti sú doplnené o obrazový materiál.

Vďaka teoretickým poznatkom sme v rámci praktickej časti vytvorili interaktívnu prezentáciu, ktorá bude slúžiť dopravným pilotom vo výcviku na zoznámenie sa s ovládaním moderného digitálneho prístrojového panelu v letúnoch Tomark Viper SD-4. Obsah prezentácie je bližšie popísaný v piatej kapitole.

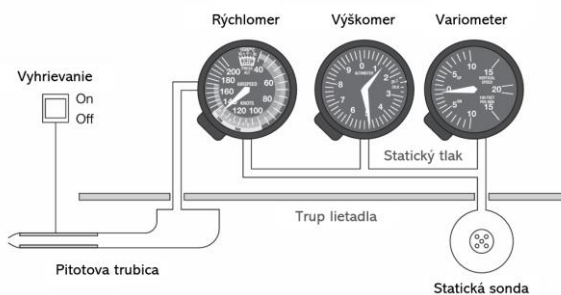
Medzi naše ciele práce patrí vytvorenie študijného materiálu pre študentov leteckej dopravy, budúcich pilotov, pilotov aj pre nadšencov pre lietanie, porovnanie konštrukcie a princípu činnosti analógových a digitálnych prístrojových panelov, vytvorenie vizualizačnej príručky informácií na prístrojovom paneli, porovnanie vizualizácie informácií na analógovom a digitálnom prístrojovom paneli a vytvorenie interaktívnej prezentácie pre základy ovládania moderného prístrojového panelu Dynon SkyView.

2. Konštrukcia a princíp činnosti snímačov tlaku a leteckých prístrojov analógového prístrojového panelu

V danej časti sa práca zameriava na jednotlivé prístroje analógového prístrojového panelu z hľadiska ich konštrukcie a princípu činnosti. Medzi prístroje analógového panelu patria aerometrické a gyroskopické prístroje a magnetický kompas. V jednotlivých podkapitolách je poskytnutý podrobný popis uvádzaných prístrojov, ktorý je doplnený o obrazový materiál.

2.1. Aerometrické prístroje

Táto podkapitola sa venuje aerometrickým prístrojom, ktoré slúžia na určenie hmotnosti alebo hustoty plynu, najmä vzduchu. [22]



Obrázok 1: Schéma aerometrických prístrojov [21]

2.1.1. Systém statického a celkového tlaku

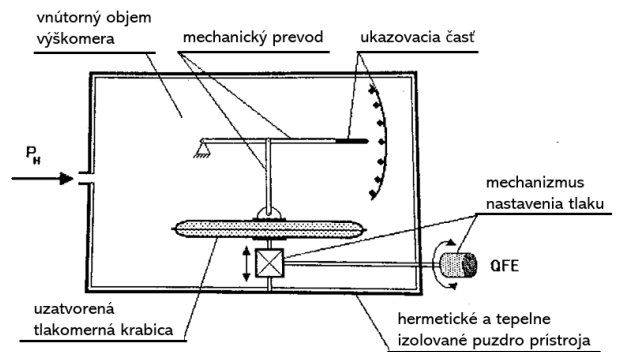
Pitot-statický systém lietadla je systém, v ktorom sa sníma a meria celkový tlak vytvorený dopredným pohybom lietadla a statický tlak atmosféry, ktorá ho obklopuje, a to z hľadiska rýchlosti, výšky a rýchlosti zmeny výšky (vertikálna rýchlosť). [20]



Obrázok 2: Pitot-statická trubica na letúne Cessna C172F Skyhawk [5]

2.1.2. Barometrický výškomer

Barometrické výškomery sú prístroje, ktoré slúžia na meranie výšky lietadla na základe snímania statického tlaku vzduchu. Základnými jednotkami sú stopy alebo metre. Výškomery kalibrované v stopách sú niekoľkonásobne presnejšie pri odčítaní ako ciachované v metroch. [1]

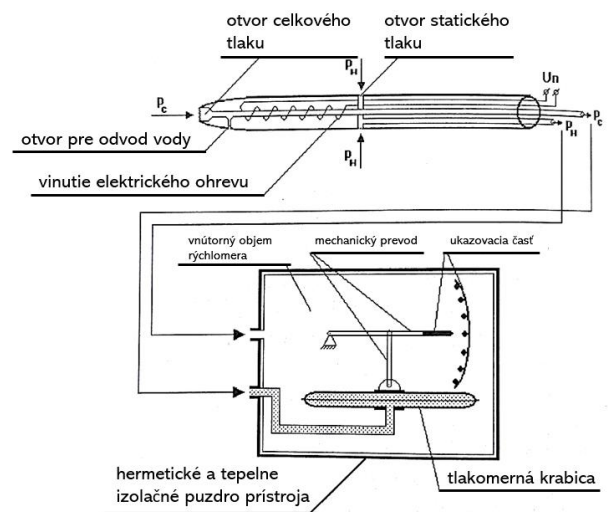


Obrázok 3: Konštrukcia barometrického výškomera [1]

2.1.3. Rýchlometer

Rýchlometer je letecký prístroj slúžiaci na meranie rýchlosti letu. Rýchlometer môžeme nazvať aj ako diferenčný tlakomer, ktorý indikuje dynamický tlak vzduchu, ktorým lietadlo letí.

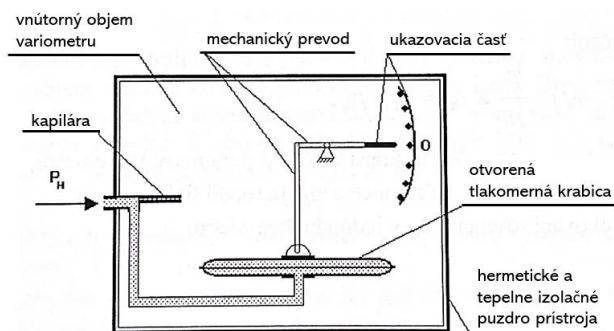
Jednoduchý rýchlometer je otvorená tlakomerná krabica, do ktorej je prívádzaný celkový tlak zo snímača celkového tlaku. Zo snímača statického tlaku je statický tlak prívádzaný do puždra prístroja. Tlakomerná krabica reaguje na rozdiel týchto tlakov zdvihom, ktorý je prenášaný mechanizmom na ručičku, ktorá indikuje dynamický tlak. [1]



Obrázok 4: Konštrukcia jednoduchého rýchlomera [1]

2.1.4. Variometer

Klasický variometer má analógové zobrazenie, ktorého ručička indikuje rýchlosť stúpania alebo klesania podľa zmeny statického tlaku v priebehu času. Variometre bývajú kalibrované v m/s alebo ft/min. [2]



Obrázok 5: Konštrukcia variometra [1]

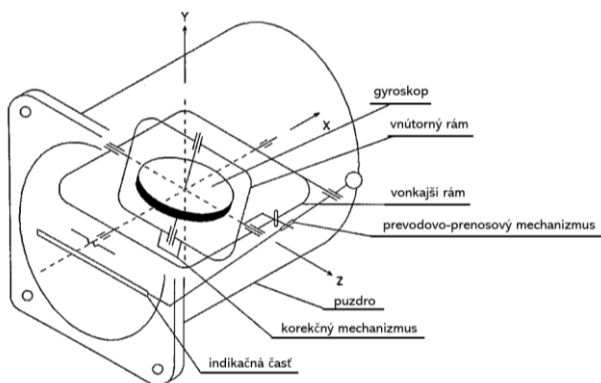
2.2. Gyroskopické prístroje

Gyroskopické prístroje poskytujú pilotovi ďalšie zobrazenia a informácie potrebné pre základnú prevádzku lietadla vrátane polohy a smeru. Táto podkapitola popisuje rôzne prístroje používané na dosiahnutie týchto zobrazení spolu s ďalšími údajmi, ktoré je možné odvodiť. Typ a množstvo gyroskopických prístrojov a systémov inštalovaných v lietadle závisí od množstva faktorov, od veľkosti lietadla, typu prevádzky, regulačných požiadaviek a tak ďalej. [21]

2.2.1. Ukazovateľ letovej polohy

Ukazovateľ letovej polohy je zotrvačnickový letecký prístroj, ktorý meria pozdĺžny a priečny sklon lietadla a tieto informácie zobrazuje pilotovi na indikačnej časti. [3]

Osa rotácie zotrvačníka je v smere miestnej vertikály a udržuje svoju polohu v priestore. Rovina otáčania zotrvačníka zobrazuje horizontálnu polohu lietadla, od ktorej sa meria pozdĺžny a priečny sklon letúna. [6]



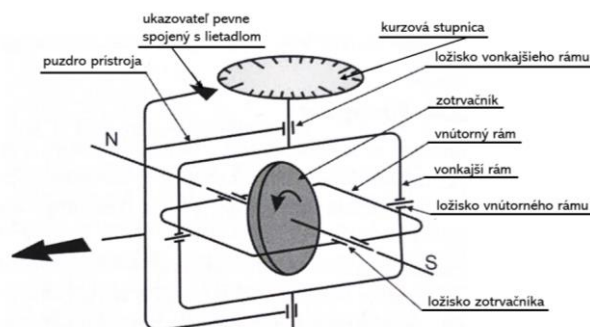
Obrázok 6: Konštrukcia ukazovateľa letovej polohy [6]

2.2.2. Smerový zotrvačník

Smerový zotrvačník je gyroskopický prístroj s tromi stupňami voľnosti a 2 ráhami určujúcimi kurz alebo smerník lietadla. [2]

Rámy tvoria tzv. Kardanov záves umožňujúci ustanoviť os rotácie zotrvačníka do ľubovoľného smeru. V ustálenom režime je os rotácie zotrvačníka vo vodorovnej rovine a v zvolenom smere. Os vonkajšieho rámu je rovnobežná so zvislou osou lietadla a os vnútorného rámu je vo vodorovnej rovine. Obidva rámy sú na

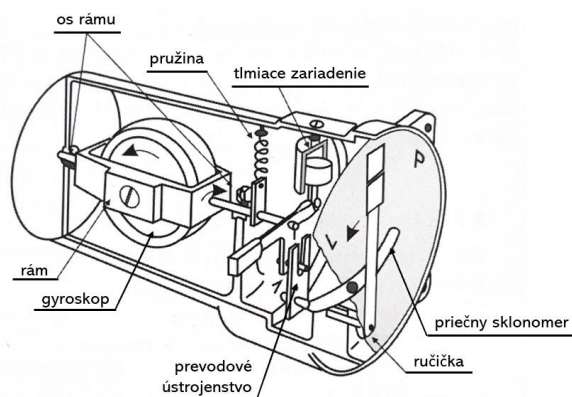
seba vzájomne kolmé. Zotrvačník je roztáčaný podtlakovým systémom alebo elektricky. [3] [6]



Obrázok 7: Konštrukcia smerového zotrvačníka [6]

2.2.3. Zatačkomer

Zatáčkomer je zotrvačnickový prístroj s 2 stupňami voľnosti a jedným rámom. Služi pilotom lietadiel k udržaniu priamočiareho letu a k vykonaniu „správnej zatačky“. Prístroj meria uhol rýchlosti otáčania lietadla v zatačke. Často býva kombinovaný spolu s priečnym relatívnym sklonomerom. Výstupné údaje sa používajú pri letoch na bezmotorových letúnoch až po lietanie podľa prístrojov. [1] [2] [6]

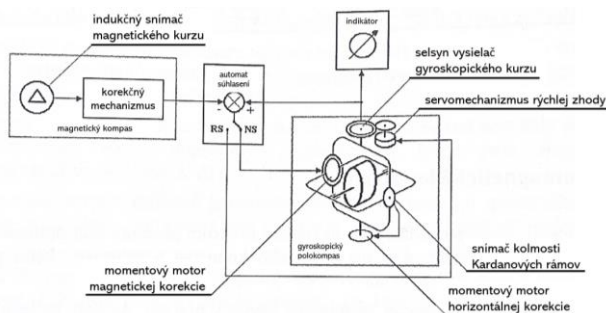


Obrázok 8: Konštrukcia kombinovaného zatačkomera so sklonometrom [6]

2.2.4. Gyromagnetické kompas

Gyroskopický magnetický kompas je systém, v ktorom prvok na detekciu magnetického smeru monitoruje prvok indikujúci gyroskop, aby na diaľku zobrazoval indikáciu kurzu. Táto kombinácia lepších vlastností magnetického kompasu a gyroskopu bola logickým krokom vo vývoji smerových zobrazovacích systémov pre použitie v lietadlách. [7]

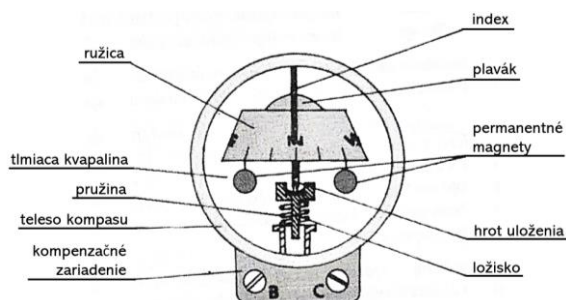
Zvyčajným umiestnením sú konce krídel lietadla, aby bol prístroj ďaleko od kovovej konštrukcie. Krátkodobá presnosť gyroskopu v kombinácii s dlhodobou presnosťou magnetického kompasu poskytuje stabilnú a presnú referenciu kurzu. [8]



Obrázok 9: Schéma gyromagnetického kompasu [1]

2.3. Magnetický kompas

Magnetický kompas je najjednoduchší prístroj, pomocou ktorého môžeme merať magnetický kurz. Základom je ružica, na ktorej je zobrazený smer, ktorým letíme. V jej strede sa nachádza hrot uloženia slúžiaci ako ložisko pre snímač obsahujúci dvojicu permanentných magnetov so zhodne orientovanými magnetmi. Hrot uloženia sa vyrába z tvrdého kovu, aby bolo dosiahnuté minimálne trenie. Magnety sú uchytené o plavák a súčasťou tohto usporiadania je aj magnetická ružica. Hrot sa opiera o ložisko, ktoré je pripevnené pomocou pružiny o teleso. Puzdro kompasu je vyplnené tlmiacou kvapalinou slúžiacou na odľahčenie otočného systému. [1] [2]



Obrázok 10: Konštrukcia magnetického kompasu [2]

3. Prechod na digitálne prístrojové panely

Digitálny prístrojový panel, podľa definície, je umiestnený v lietadle, ktoré obsahuje elektronické prístrojové displeje. Tradičný kokpit sa pri zobrazovaní informácií spolieha na početné analógové (mechanické) prístroje a zobrazovacia jednotka na digitálnom prístrojovom paneli využíva niekoľko počítačových displejov, ktoré je možné nastaviť tak, aby zobrazovali informácie o lete podľa potreby.

Cirrus Design Corporation bola prvá firma, ktorá v roku 2003 certifikovala celý elektronický systém leteckých prístrojov (EFIS) na letúne SR-22 [obr. 11], a potom Cessna, Piper, Mooney a Hawker Beech čoskoro uplatnili vlastné návrhy preskleného kokpitu. [4]



Obrázok 11: Prvý letún s digitálnym prístrojovým panelom Cirrus SR-22 [14]

3.1. Výhody digitálneho prístrojového panelu

Medzi výhody digitálneho prístrojového panelu patrí:

- situačné povedomie,
- spoľahlivosť,
- presné indikácie,
- zníženie pracovného zaťaženia. [13]

3.2. Nevýhody digitálneho prístrojového panelu

Medzi nevýhody digitálneho prístrojového panelu patrí:

- vysoká cena,
- neodporúča sa pre počiatočný letecký výcvik,
- obavy o bezpečnosť. [13]

4. Konštrukcia a princíp činnosti prvkov digitálneho prístrojového panelu

Digitálny prístrojový panel a jeho prvky z hľadiska konštrukcie a princípu činnosti jednotlivých prvkov sú definované v nasledujúcej časti. Základom digitálneho prístrojového panelu je EFIS (elektronický systém leteckých prístrojov). V podkapitolách sú popísané rôzne typy displejov (CRT, LCD, LED) a základné prístrojové komponenty (ADC, RLG, MEMS technológia, systémy diaľkového kompasu, magnetometer, AHRS). Celá kapitola poskytuje podrobný popis uvádzaných prístrojov, ktorý je doplnený o obrazový materiál.

3.1. Elektronický systém leteckých prístrojov (EFIS)

Elektronický systém leteckých prístrojov (EFIS) je zobrazovací systém palubných prístrojov používajúci zobrazovaciu technológiu skôr elektronickú ako elektromechanickú. Prvé systémy EFIS zobrazovali informácie pomocou technológie katódových trubíc (CRT). Neskoršie prístrojové displeje sú zobrazované na viacfarebných displejoch s tekutými kryštálmi (LCD), ktoré nahrádzajú niektoré alebo všetky konvenčné letové prístroje pre oboch pilotov. Na jednej obrazovke je možné zobraziť viac informácií ako u klasických analógových prístrojov, na ktorých sú informácie dôležité pre let rozdelené na viacerých prístrojoch na prístrojovom paneli. [1] [17]

Klasický EFIS sa skladá z primárneho letového displeju (PFD) a navigačného systému (ND), ktoré si uvedieme nižšie. [17]



Obrázok 12: Diamond DA42 s EFIS [9]

4.1.1. Primárny letový displej (PFD)

Primárny letový displej (PFD) je prístroj, ktorý integruje a zobrazuje na jednom displeji všetky informácie, ktoré boli historicky zobrazované na množstve jednotlivých elektromechanických prístrojov. PFD sa vyvinul zo základnej kombinácie ukazovateľa letovej polohy/letového smerovača, prezentovanej elektronicky na CRT.

Podľa výrobcu sa pridávali ďalšie informácie, ako je kurz, nadmorská výška a rýchlosť letu. Moderné PFD zobrazujú prakticky všetky informácie, ktoré pilot potrebuje na určenie základných parametrov letu (nadmorská výška, poloha v priestore /klonenie a klopenie/, rýchlosť letu, vertikálna rýchlosť, kurz atď.), ďalej aj stav zapojenia autopilota a automatického ťahu, režimy autopilota a stav priblíženia. [17]



Obrázok 13: Primárny letový displej (PFD) Garmin G1000 [18]

4.1.2. Navigačný displej (ND)

Elektronický indikátor horizontálnej situácie (EHSI), často označovaný ako navigačný displej (ND), nahrádza množstvo rôznych prístrojov na bežnom prístrojovom paneli lietadla a možno ho použiť na zobrazenie smeru letu, zvoleného smeru alebo trate, zameranie na navigačný maják alebo z neho, laterálna odchýlka od zvolenej trate, rýchlosť voči zemi, vzdialenosť a čas do cieľa, letecká mapa, informácie o počasí, a ďalšie informácie podľa dizajnu. [17]



Obrázok 14: Navigačný displej (ND) Garmin G1000 [19]

4.2. Konštrukcia a princíp činnosti jednotlivých typov displejov

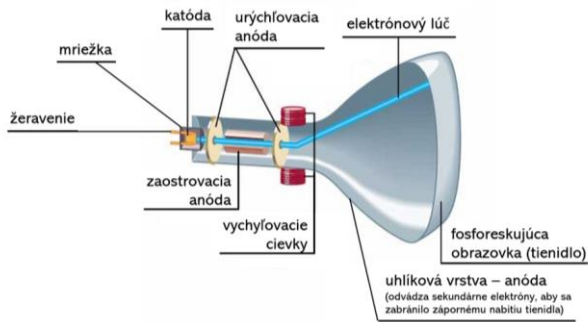
V nasledujúcej časti sú prezentované jednotlivé typy displejov, ich konštrukčné parametre z hľadiska termoemisíí, využitia tekutých kryštálov, polarizácie, využitia pixelov pre lepšie zobrazovanie a princíp činnosti jednotlivých typov displejov, ich výhody aj nevýhody pri zobrazovaní podstatných údajov. Podkapitoly sú doplnené obrazovým materiálom.

4.2.1. Cathode Ray Tube displej

Katódová trubica (CRT) je termoemisné zariadenie, v ktorom sa v dôsledku tepelnej energie uvoľňujú elektróny. Skladá sa z vákuovej sklenenej banky, v ktorej sa nachádza elektrónové delo a systémy zaostrovania a vychyľovania lúča. Vnútorý povrch tieniacej časti pokrýva fosfor – pevná kryštalická látka. Elektrónové delo pozostáva z nepriamo žeravenej katódy, ktorá je záporne nabitá voči tienidlu, valcovej mriežky, obklopujúcej katódu a z dvoch alebo troch anód. Keď je katóda rozžeravená, elektróny sú emitované a prechádzajú pomedzi usmerňovacie anódy formujúce lúč.

Záporný potenciál, ktorý sa udržiava na mriežke má za účel riadiť prúd, a tak modulovať lúč elektrónov, ktoré prechádzajú cez otvor v mriežke. Anódy sú kladné voči katóde a elektróny urýchľujú na vysokú rýchlosť, až pokiaľ nenarazia na povrch tienidla. Anódy ďalej zaisťujú proces zaostrovania (zaostrovacia anóda), ktorý pozostáva z dvoch fáz.

Sily, ktoré sú vyvolané poľom medzi mriežkou a prvou anódou zaostrujú elektróny do bodu pred anódou a následne sa rozbiehajú. Ďalej pokračujú do druhého zaostrovacieho bodu poľa v oblasti medzi tromi anódami. Riadenie zaostrovania je zaistené zmenou potenciálu na tretej anóde zaostrujúcej lúč do bodu na povrchu tienidla. Keď elektróny narazia na povrch tienidla, fosforový materiál zasvetieľkuje v bode dopadu lúča. Tento proces spôsobí malú emisiu svetla na strane tienidla. [16]

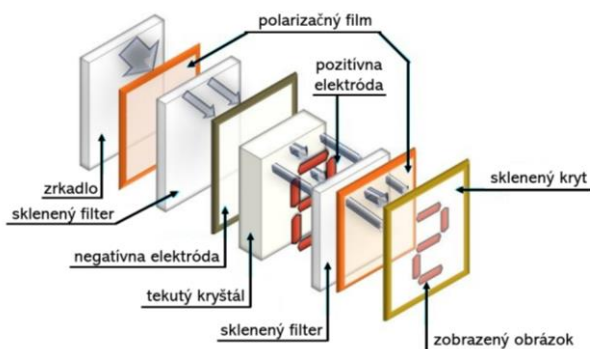


Obrázok 15: Zloženie CRT obrazovky [4] [16]

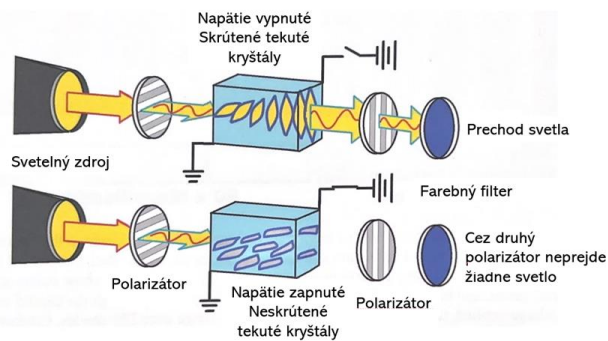
4.2.2. Displej z tekutých kryštálov (LCD)

Displej z tekutých kryštálov je elektrooptický amplitúdový modulátor realizovaný ako tenké, ploché zobrazovacie zariadenie tvorené ľubovoľným počtom farebných alebo monochromatických pixelov usporiadaných pred svetelným zdrojom alebo reflektorom. Často sa používa v elektronických zariadeniach napájaných z batérie, pretože využíva minimálne množstvo elektronickej energie. Tento druh displejov vyžaduje veľmi malé napätie na aktiváciu každého pixelu na zobrazenie displeja, čo je ich hlavnou výhodou.

Tieto druhy displejov sa konštruujú dvomi rôznymi spôsobmi, čo ich delí na displeje odrazené (reflexné) alebo podsvietené. Rozdiel medzi týmito dvoma displejmi je zdroj svetla pre pixel. [4]



Obrázok 16: Konštrukcia reflexnej LCD obrazovky [4]



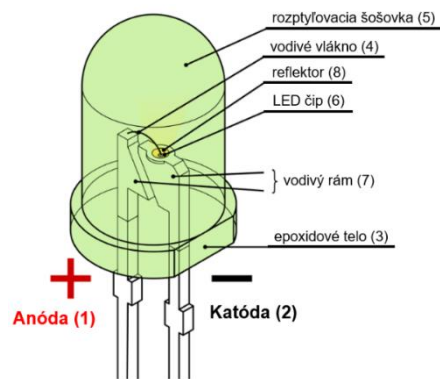
Obrázok 17: Konštrukcia podsvietenej LCD obrazovky [4]

4.2.3. LED displej

Hlavný rozdiel LED displejov oproti zobrazovacím jednotkám z tekutých kryštálov je v tom, že LED diódy produkujú svetlo, keď nimi preteká prúd. Môžu byť vyrobené tak, aby fungovali v mnohých rôznych farbách na displeji. Okrem toho je možné vyrobiť LED diódy na zmenu jasu podľa požiadaviek v tmavom kokpite.

LED dióda je elektronická polovodičová súčiastka, ktorá obsahuje P-N prechod, vďaka ktorému LED dióda vyžaruje svetlo a cez P-N prechod prechádza elektrický prúd.

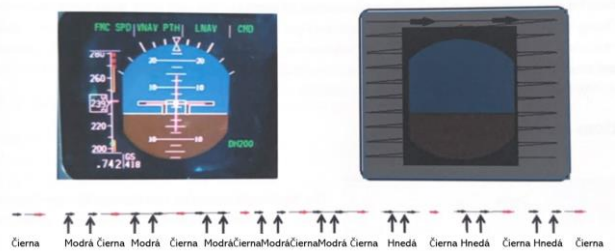
Kladný náboj je privádzaný vodičom cez anódu (1) LED diódy do vlákna (4). Druhá časť diódy je zapojená k vodivému rámu (7) vedúcemu z katódy (2) k zápornému pólu. O farbe vyžarovaného svetla rozhoduje chemické zloženie LED polovodiča (6). [obr. 18] [23]



Obrázok 18: Konštrukcia LED diódy [23]

4.2.4. Princíp činnosti vzniku obrazu na zobrazovacích jednotkách

Zobrazovacie jednotky lietadiel nie sú fotografie alebo živá akcia, ale grafický obraz, podobne ako prvá počítačom vytvorená kresba. Obraz pre displej nie je vytvorený z úrovni svetla a tieňa, ale z riadkov kódu. Počítač potom kód preloží a pošle do CRT, aby vytvoril hotový obraz. [4]



Obrázok 19: Proces vytvárania grafiky pre CRT displeje [4]

4.2.5. Prechod na LED a LCD displeje

Jednou z najväčších novinek v kokpite bol prechod z CRT na moderné zobrazovacie jednotky. Moderné displeje neprodukujú teplo, ktoré produkujú sklenené katódové trubice a najmä s LED diódami sa môže jas moderných leteckých displejov meniť podľa potreby. [4]

4.2.6. Obmedzenia výpočtovej techniky

Limitujúcimi faktormi, ktoré spomalili vývoj systémov digitálnych kokpitov, boli obmedzenia výpočtového výkonu a rýchlosti počítačov. Pôvodné systémy preskleného kokpitu využívali analógovo vytvorené informácie, ktoré sa vytvárajú rovnakým spôsobom ako klasické analógové indikátory kokpitu. V prvých systémoch preskleného kokpitu sa všetky analógové informácie posielali do centrálneho počítača nazývaného generátor symbolov. Pôvodné generátory symbolov pre systémy lietadiel mali veľmi obmedzenú výpočtovú rýchlosť. [4]

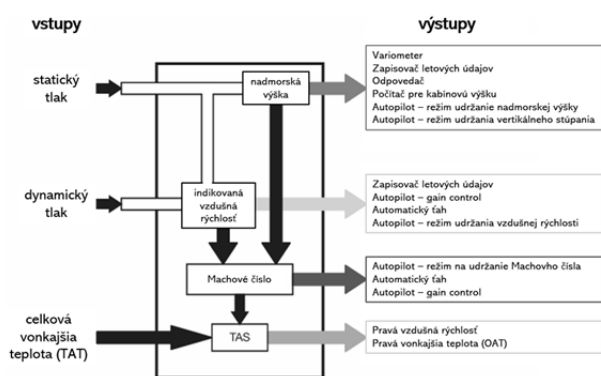
4.3. Základné prístrojové komponenty

V tejto časti práce sú bližšie uvedené základné prístrojové komponenty digitálneho prístrojového panelu, ktorými sú Air Data Computer (ADC), laserový gyroskop, systém diaľkového kompasu, magnetometer a AHRS. Odprezentujeme si aj MEMS technológiu, ktorá sa používa pri digitálnych prístrojových paneloch.

4.3.1. Air Data Computer (ADC)

Niektoré lietadlá majú inštalované zariadenie, ktoré zahŕňa jednu alebo viacero funkcií leteckých údajov, napr. Machovo číslo, pravá vzdušná rýchlosť (TAS), indikovaná vzdušná rýchlosť (IAS), atď. Na výpočet ktorejkoľvek z týchto funkcií sú potrebné vstupy na meranie celkového a statického tlaku spolu s teplotou vonkajšieho vzduchu.

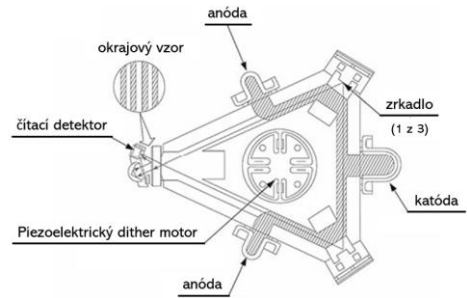
ADC môžu byť zabudované do panelových displejov, alebo v priestore prístrojového vybavenia. Existuje široká škála technológií používaných na návrh a konštrukciu ADC, vrátane elektromechanických a digitálnych systémov. [21]



Obrázok 20: Diagram ADC [21]

4.3.2. Laserový gyroskop

Ring Laser Gyros (RLG) využíva interferenciu laserového lúča v rámci optickej dráhy alebo prstenca na detekciu rotačného posunu, na meranie zmien sklonu, natočenia a smeru (azimutu). Laserové gyroskopy v skutočnosti nie sú gyroskopy v prísnom zmysle slova – sú to v skutočnosti snímače uhlovej rýchlosti otáčania okolo osi. Primárne použitie RLG je v inerciálnych navigačných systémoch (INS) a referenčných systémoch polohy a kurzu (AHRS). [21]



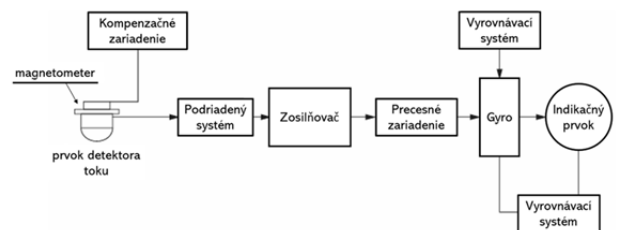
Obrázok 21: Schéma RLG [21]

4.3.3. MEMS technológia

MEMS senzory detegujú zmeny odporu alebo kapacity, keď sú vystavené sile na ich povrchu. Medzi dvoma kapacitnými doskami sa nachádza hmota, ktorá pri naklonení vytvára rozdiel v elektrickom potenciáli, čo vedie k zmene kapacity. Zmeny kapacity sa potom môžu previesť na elektrické signály, ktoré môžu byť rozpoznané a pochopené zariadeniami, ktoré sú k nim pripojené. [12]

4.3.4. Systém diaľkového kompasu

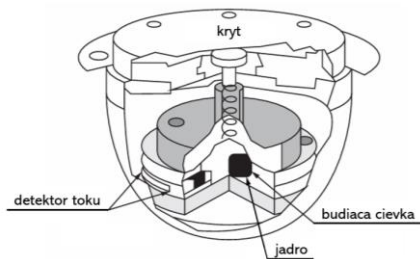
Klasické magnetické kompasy sú nespoľahlivé z krátkodobého hľadiska – počas otáčania. Smerové gyroskopy sú spoľahlivé na vedenie azimutu v krátkodobom horizonte, ale počas dlhších časových úsekov sa pohybujú. Kombinovaný magnetický kompas stabilizovaný smerovým gyroskopom (označovaný ako gyromagnetický kompas) dokáže tieto nedostatky prekonať.



Obrázok 22: Schéma systému diaľkového kompasu [21]

4.3.5. Magnetometer / prietokový ventil

Prietokový ventil sa skladá z dvoch hlavných komponentov – magnetického snímača a kompenzačného zariadenia. Snímač je závesné zariadenie, ktoré sa môže voľne pohybovať v závislosti od sklonu a nakláňania. Vnútrotný priestor je čiastočne naplnený ľahkým olejom na tlmenie kmitov počas letu. Kompenzačné zariadenie umiestnené v hornej časti jednotky pozostáva z dvoch párov elektromagnetických cievok. Cievky sú napájané jednosmerným napätím zo zosilňovača systému kompasu a používa sa na kompenzáciu magnetických polí lietadla. [21]



Obrázok 23: Konštrukcia leteckého elektromechanického prietokového ventilu [21]

4.3.6. Referenčný systém polohy a kurzu (AHRS)

AHRS pozostáva z laserových alebo MEMS gyroskopov, akcelerometrov a magnetometrov na všetkých troch osiach. AHRS tiež zahŕňa integrované spracovanie, ktoré vypočítava riešenia polohy a smeru. Jednou zo základných princípov pokročilých navigačných systémov je použitie Kalmanových filtrov. Na základe princípov Kalmanových filtrov je navigačný systém založený na inerciálnych navigačných senzoch s periodickými aktualizáciami z rádionavigačných zariadení. Jedným z kľúčových prevádzkových aspektov inerciálnej navigácie je, že systémové chyby sa časom hromadia. Keď systém dostane opravu polohy z navigačných pomôcok, chyby inerciálneho navigačného systému sa opravujú. [21]



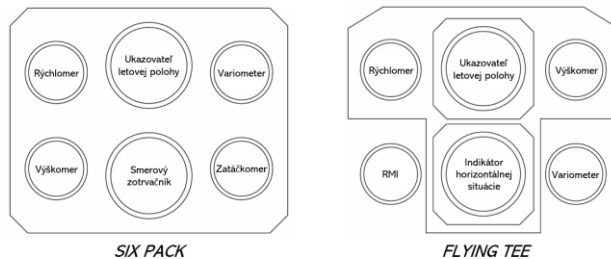
Obrázok 24: Referenčný systém údajov o vzduchu, polohe a smeru (ADAHRS) [28]

5. Vizualizácia informácií na prístrojovom paneli

Táto časť práce poskytuje prehľad vizualizácie informácií na prístrojovom paneli – umiestnenie primárnych letových prístrojov v starších, a aj v súčasnej dobe používaných letúnoch, ich usporiadanie na prístrojovom paneli v rôznych druhoch letúnov. Výhody a nevýhody jednotlivých prístrojov so zameraním na ich využitie ako v starších, tak aj v nových druhoch či verziách letúnov. Jednotlivé časti sú doplnené o obrazový materiál.

5.1. Usporiadanie prístrojového panelu

Aerometrické a gyroskopické prístroje sú označované ako primárne letecké prístroje. Sú usporiadané v prístrojovom paneli jedným z niekoľkých konvenčných spôsobov – „flying Tee“ alebo „six pack“ [obr. 25]. [21]



Obrázok 25: Základné rozloženia leteckých prístrojov na prístrojovom paneli [21]

5.1.1. Umiestnenie leteckých prístrojov na prístrojovom paneli podľa druhu letúna

Prístrojový panel v prípade jednopilotného lietadla je umiestnený priamo pred pilotom. Malé letúne všeobecného letectva sú tradične navrhnuté tak, že veliteľ sedí na ľavom sedadle. Vo väčších dopravných lietadlách s dvojpilotnou posádkou sú prístroje zdvojené. [21]



Obrázok 26: Rozloženie leteckých prístrojov podľa typu letúna [24] [25]

5.2. Aerometrické prístroje

Medzi aerometrické prístroje patrí výškomer, rýchlomer a variometer. V tejto podkapitole sú uvedené vizualizácie informácií na týchto leteckých prístrojoch – na digitálnych a analógových prístrojových paneloch.

5.2.1. Výškomer



Obrázok 27: Vizualizácia informácií na analógovom a digitálnom výškomere [26] [27]

Výškomery na obr. 27 sú kalibrované v stopách, čo je najviac zaužívaná jednotka výšky v letectve. V starších lietadlách československej a sovietskej výroby sa môžeme stretnúť aj s výškomermi kalibrovanými v metroch, ale nie sú natoľko presné ako výškomery kalibrované v stopách. Jednotky, v ktorých sú kalibrované výškomery, musia byť dostatočne viditeľne uvedené na prístroji, aby nedošlo k chybe pri odčítaní pilotom. [1]

Na oboch typoch prístrojov môžeme vidieť dlhé a krátke deliace značky. Dlhé indikujú zmenu výšky o 100 stôp a krátke o 20 stôp. [3]

5.2.2. Rýchlo mer



Obrázok 28: Vizualizácia informácií na analógovom a digitálnom rýchlomere [26] [27]

V letectve sa môžeme stretnúť s rýchlo mermi kalibrovanými v uzloch, km/h a mph. Najčastejšie sú využívané rýchlo mer kalibrované v uzloch. Jednotky, v ktorých sú kalibrované rýchlo mer, musia byť dostatočne viditeľne uvedené na leteckom prístroji, aby nedošlo k chybe pri odčítaní pilotom. Všetky klasické rýchlo mer ukazujú indikovanú vzdušnú rýchlosť (IAS). Na digitálnych prístrojových paneloch môžeme vidieť aj pravú vzdušnú rýchlosť (TAS) [obr. 28 – na PFD v pravom rohu pod zobrazovacím stĺpcom indikátora rýchlosti]. [1]

Dlhé a krátke deliace značky na rýchlo mere pomáhajú lepšie určiť rýchlosť, pričom dlhé indikujú zmenu rýchlosti o 10 uzlov a krátke o 5 uzlov. [3]

Rýchlo mer lietadiel všeobecného letectva používajú systém farebne odlišených značiek [obr. 29] umožňujúcich pilotovi okamžite určiť obmedzenia rýchlosti letu, ktoré sú dôležité pre bezpečnú prevádzku lietadla. Toto farebné odlišenie má rovnaký význam u analógových a aj u digitálnych rýchlo merov. [3]



Obrázok 29: Štandardné farebné odlišovacie značky na rýchlo mere [3]

5.2.3. Variometer



Obrázok 30: Vizualizácia informácií na analógovom a digitálnom variometre [26] [27]

Variometer, niekedy nazývaný indikátor vertikálnej rýchlosti (VSI), udáva či lietadlo stúpa, klesá, alebo je vo vodorovnom lete. Rýchlosť stúpania alebo klesania je uvedená v stopách za minútu (fpm). Činnosť variometra je závislá od prísunu statického tlaku, nakoľko je určený na meranie jeho rozdielu.

Na analógovom prístrojovom paneli má typický variometer dlhé a krátke deliace značky, pričom každá dlhá značka predstavuje 500 stôp za minútu (5 = 500 ft/min) a každá krátka značka

predstavuje 100 stôp za minútu (prvá značka = 100 ft/min, druhá značka = 200 ft/min).

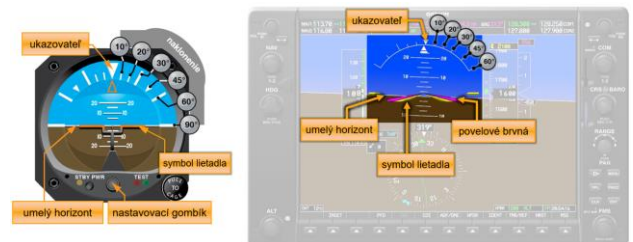
Na digitálnom prístrojovom paneli má variometer dlhé a krátke deliace značky. Každá dlhá značka má vedľa seba číslicu, ktorá indikuje 100 stôp za minútu (2 = 2 000 ft/min) a každá krátka značka predstavuje 500 stôp za minútu. [3]

5.3. Gyroskopické prístroje

Viacere letecké prístroje využívajú na svoju činnosť vlastnosti gyroskopu. Najbežnejšími prístrojmi obsahujúcimi gyroskopy sú ukazovateľ letovej polohy, smerový zotrvačník, zatáčkomer a gyromagnetický kompas. Činnosť týchto prístrojov bola popísaná v druhej kapitole a v tejto podkapitole sú uvedené vizualizácie informácií na gyroskopických prístrojoch. [3]

5.3.1. Ukazovateľ letovej polohy

Ukazovateľ letovej polohy disponuje symbolom malého lietadla a čiarou horizontu, ktorá zobrazuje polohu lietadla voči horizontu. Vzťah indikovaného lietadla k priečke horizontu je rovnaký ako vzťah skutočného lietadla k skutočnému horizontu. Prístroj poskytuje okamžitú indikáciu aj tých najmenších zmien. [3]



Obrázok 31: Indikácia informácií na analógovom a digitálnom ukazovateli letovej polohy [3] [27]

Ukazovateľ v hornej časti leteckého prístroja indikuje uhol náklonu vyznačený na stupnici náklonu s čiarami, ktoré predstavujú 10°, 20°, 30°, 45° a 60° [obr. 31].

Horizontálna čiara je súčasťou stupnice klopenia (sklonu). Nad a pod čiarou horizontu sa zobrazujú hlavné deliace značky a číselné označenia pre každých 10° až do 80°. Dlhé deliace značky sú zobrazené pre 5° prírastky až do 25° pod a 45° nad horizontom. Medzi 20° pod a 20° nad horizontom sa každé 2,5° značia menšími značkami klopenia (sklonu). [15]

5.3.2. Smerový zotrvačník

Ciferník smerového zotrvačníka je odstupňovaný písmenami reprezentujúcimi svetové strany (N, E, S, W), číslami každých 30° a deliacimi značkami. Dlhé deliace značky sa nachádzajú každých 10° a krátke každých 5°. Konečná „0“ je za číslicami smerov vynechaná. Napríklad 9 = 90°, 12 = 120°, 5 = 150° a 33 = 330°. Na analógovom a digitálnom prístrojovom paneli je indikácia tohto leteckého prístroja rovnaká, pričom pri klasickom zotrvačníku je potrebné vykonávať kontrolu a opravu smeru každých 15 minút, no pri digitálnom smerovom zotrvačníku túto kontrolu a opravu nie je potrebné vykonávať vďaka AHRS. [3] [6]



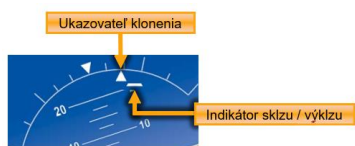
Obrázok 32: Vizualizácia informácií na analógovom a digitálnom smerovom zotrvačníku [26] [27]

5.3.3. Zatačkomer



Obrázok 33: Vizualizácia informácií na analógovom a digitálnom smerovom zotrvačníku [26] [27]

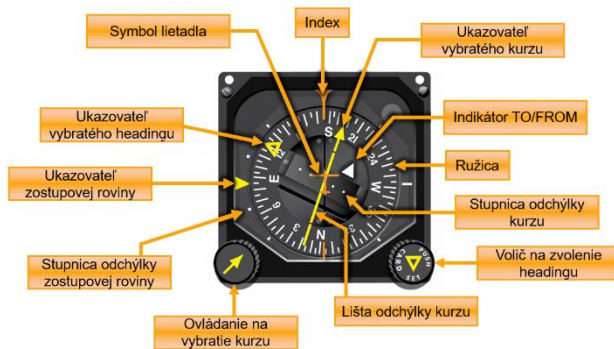
Ciferník na analógovom prístrojovom paneli je označený "2 MIN TURN". Niektoré zatačkomy používané v rýchlejších lietadlách sú označené "4 MIN TURN". V oboch leteckých prístrojoch sa štandardná rýchlosť otáčania vykoná vždy, keď sa profil krídla symbolu lietadla zarovná s bielou čiarou, taktiež prezývanou „doghouse“. Štandardná rýchlosť otáčania je 3° za sekundu. V 2-minútovom zatačkometri, ak sa profil krídla zarovná s „doghouse“, otočenie je 3° za sekundu a otočenie o 360° trvá 2 minúty. U 4-minútových zatačkometroch otočenie o 360° trvá 4 minúty. [3]



Obrázok 34: Indikácia informácií na zatačkometri na digitálnom prístrojovom paneli [15]

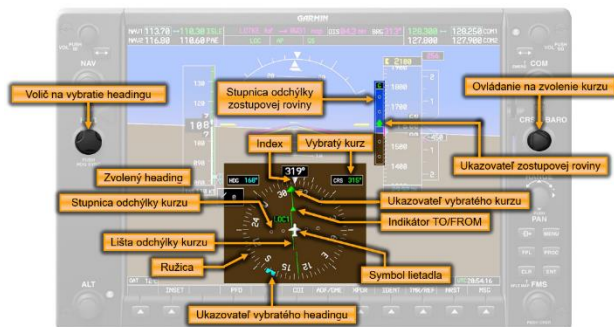
Indikátor sklzu/výkľzu je pruh pod ukazovateľom klonenia. Jeden posun pruhu sa rovná jednému posunu guľičky na tradičnom sklonometri. Indikátor sa pohybuje spolu s ukazovateľom klonenia a pohybuje sa bočne preč od ukazovateľa, čím indikuje nekoordinovaný let. Sklz (vo vnútri zákruty) alebo výkľz (von zo zákruty) je indikovaný umiestnením pruhu indikátora preč vzhľadom od ukazovateľa. [15]

5.3.4. Gyromagnetická kompas



Obrázok 35: Indikácia informácií na gyromagnetickom kompase na analógovom prístrojovom paneli [3]

Na obr. 35, kurz lietadla zobrazený na ružici pod horným indexom je 175°. Ukazovateľ (šípka) označujúci vybraný kurz je nastavený na 197°, zadná časť šípky ukazuje opačný uhol 017°. Ružica je označená písmenami reprezentujúcimi svetové strany: sever (N), východ (E), juh (S) a západ (W), a číslicou pre každých 30° medzi týmito písmenami. Konečná „0“ je z týchto smerov vynechaná. Napríklad 3 = 30°, 6 = 60° a 33 = 330°. Medzi písmenami a číslicami sú dlhé a krátke deliace značky, pričom každá dlhá značka predstavuje 10° a každá krátka značka 5°. Lišta odchýlky od kurzu funguje v spolupráci s navigačným prijímačom VOR/LOC a indikuje odchýlku vpravo alebo vľavo od kurzu zvoleného šípkou ukazujúcou kurz. Ukazovateľ odchýlky zostupovej roviny ukazuje vzťah lietadla k zostupovej rovine. Keď je ukazovateľ pod stredovou polohou, lietadlo je nad zostupovou rovinou, vyžaduje sa zvýšená rýchlosť klesania. Ak sa nachádza ukazovateľ nad stredovou polohou, lietadlo je pod zostupovou rovinou, a to si vyžaduje opačnú činnosť od pilota – stúpanie. Na obr. 35, lietadlo letí správnym kurzom a aj zostupovým uhlom. [3]



Obrázok 36: Indikácia informácií na gyromagnetickom kompase na digitálnom prístrojovom paneli [27]

Na obr. 36 je kurz lietadla zobrazený na ružici pod horným indexom je 319°. Ukazovateľ (šípka) označujúci vybraný kurz je nastavený na 315°, zadná časť šípky ukazuje opačný uhol 135°. Lišta odchýlky od kurzu funguje v spolupráci s navigačným prijímačom VOR/LOC a indikuje odchýlku vľavo od kurzu zvoleného šípkou ukazujúcou kurz. Lietadlo sa nachádza vľavo od vybraného kurzu. VOR/LOC prijímač prijíma signál od LOC. Nastavený heading je 168° a aktuálny, ktorým lietadlo letí je 319°.

Ukazovateľ odchýlky zostupovej roviny indikuje, že sa lietadlo nachádza pod zostupovou rovinou a od pilotov sa vyžaduje, aby na krátky moment znížili uhol klesania, dokým sa lietadlo nedostane na správnu zostupovú rovinu, a potom môže pilot pokračovať v predpísanom klesaní, ktoré sa očakáva od typu priblíženia a približovacej rýchlosti. [3]

5.3.5. Magnetický kompas



Obrázok 37: Vizualizácia informácií na analógovom a digitálnom magnetickom kompase [3] [27]

Magnetický kompas lietadla [obr. 37] má dva malé magnety pripevnené k plaváku utesnenému vo vnútri kapsule kompasu s čírou tekutinou podobnou petroleju. Odstupňovaná stupnica, nazývaná ružica, je pozorovaná cez sklenené okienko s indexom, ktorý indikuje smer. Ružica je označená písmenami reprezentujúcimi svetové strany: sever (N), východ (E), juh (S) a západ (W), a číslom pre každých 30° medzi týmito písmenami. Konečná „0“ je z týchto smerov vynechaná. Napríklad 3 = 30°, 6 = 60° a 33 = 330°. Medzi písmenami a číslami sú dlhé a krátke deliace značky, pričom každá dlhá značka predstavuje 10° a každá krátka značka 5°. [3]

6. APLIKOVANIE TEORETICKÝCH POZNATKOV DO PRAXE

Vďaka teoretickým poznatkom sme v rámci praktickej časti vytvorili interaktívnu prezentáciu, ktorá bude slúžiť dopravným pilotom vo výcviku na zoznámenie sa s ovládaním moderného digitálneho prístrojového panelu v letúnoch Tomark Viper SD-4, ktoré tvoria najväčšie zastúpenie letúnov vo flotile Leteckého výcvikového a vzdelávacieho centra, ktoré spadá pod Žilinskú univerzitu v Žiline.

6.1. Interaktívna prezentácia pre ovládanie moderného digitálneho prístrojového panelu Dynon SkyView

Po dôkladnom naštudovaní prezentácie bude študent schopný absolvovať všetky fázy počiatočného výcviku bez problémov. Bude schopný vedieť určiť, kde sa nachádzajú jednotlivé informácie na primárnom letovom displeji, ako napríklad smer odkiaľ fúka vietor a aj rýchlosť vetra, a kde sa nachádzajú informácie na navigačnom displeji, ako napríklad určenie svojej polohy voči priestoru. Prezentácia naučí pilotov pri základnom výcviku nastavenie kurzu, QNH atď. V neskoršej fáze výcviku, pri navigačných letoch, budú schopní vedieť nastaviť kód na odpovedači. Pri strate orientácie si študenti môžu pomôcť navigačným displejom, ktorý im pomôže s určením ich polohy. Pri dlhých navigačných letoch budú vedieť nastaviť si trať letu, ktorú budú mať vykreslenú na navigačnom displeji a naučia sa ešte mnoho ďalšieho.



Obrázok 38: Interaktívna prezentácia pre ovládanie moderného digitálneho prístrojového panelu Dynon SkyView

[Zdroj: autor]

7. Metodika a metódy skúmania

Téma bakalárskej práce bola vybratá z dôvodu vytvorenia študijného materiálu pre študentov a ľudí zaujímavých sa o vývoj prístrojového vybavenia lietadiel všeobecného letectva v slovenskom jazyku. Na začiatku písania práce sme si stanovili metódy práce, ktoré boli použité v teoretickej a aj praktickej časti. Pre písanie bakalárskej práce sme použili rôzne metódy skúmania, a to literárnu rešerš, komparáciu a syntézu. Tieto typy metódy práce nám poslúžili k podstate skúmaného javu na získanie určitých poznatkov na dosiahnutie nami požadovaného cieľa. [10] [11]

8. Záver

Letectvo ako priemysel smeruje k moderným (digitálnym) kokpitom a dnes by sme ťažko hľadali nové lietadlo prichádzajúce z továrne s analógovým kokpitom. Dokonca aj staršie lietadlá, pôvodne dodávané s analógovými prístrojovými panelmi, sú dodatočne prerobené na digitálne prístrojové panely. Oba typy kokpitov sú dnes stále vo veľkej miere používané v lietadlách a sú bezpečné pre prevádzku. Piloti musia byť zoznámení s obidvoma typmi, aby bez problémov vedeli vykonať let na letúnoch rôzneho vybavenia. Táto bakalárska práca im môže poslúžiť ako študijný materiál, aby sa oboznámili s tradičným a aj moderným kokpitom. Po podrobnom naštudovaní bude čitateľ schopný určiť, kde a aké informácie na zobrazovacích jednotkách nájde a taktiež bude vedieť popísať rozdiel medzi princípmi činnosti a konštrukciou jednotlivých prvkov prístrojových panelov.

V prvej kapitole sme si podrobne rozobrali konštrukciu a princíp činnosti snímačov tlaku a leteckých prístrojov analógového prístrojového panelu. Podrobný text bol doplnený o obrazový materiál, z ktorého sa čitateľ lepšie oboznámil s konštrukciou všetkých prvkov používaných v tradičných pilotných kabínach.

Súčasný moderný kokpity disponujú digitálnym prístrojovým panelom, no pred oboznámením sa s ním, sa musíme zoznámiť s príchodom moderného konceptu a následne s jeho výhodami a aj nevýhodami.

Tretia časť bakalárskej práce sa venuje konštrukcii a princípu činnosti hlavných prvkov používaných pre digitálne prístrojové panely. Pre správne fungovanie elementov medzi sebou je potrebné využitie MEMS technológie, ktorá je v danej kapitole

blížšie popísaná, ako aj jej samostatné zloženie a princíp činnosti.

Štvrtá kapitola slúži ako vizualizačná príručka pre porovnávanie distribúcie informácií na jednotlivých typoch prístrojových panelov. V danej časti je obrazový materiál, ktorý podrobne popisuje rozloženie dát na zobrazovacích jednotkách tradičných a moderných kokpitov.

Po dôkladnom spracovaní predošlých kapitol sme následne v rámci praktickej časti vytvorili interaktívnu prezentáciu, ktorá poslúži študentom aj pilotom, aby sa oboznámili so základným ovládaním digitálneho prístrojového panela Dynon SkyView, ktorými disponuje aj letún Tomark Viper SD-4, ktorý tvorí najväčšie zastúpenie vo flotile LVVC v Žiline. Vďaka prezentácii budú začínajúci piloti schopní absolvovať lety na danom type lietadla bez problémov.

Cieľmi našej práce bolo vytvorenie študijného materiálu pre študentov leteckých odborov, budúcich pilotov, rekreačných a dopravných pilotov, a aj pre nadšencov letania, následné porovnanie konštrukcie a princípu činnosti analógového a digitálneho prístrojového panelu, vytvorenie vizualizačnej príručky distribúcie informácií na oboch typoch prístrojových panelov a vytvorenie interaktívnej prezentácie pre základy ovládania moderného prístrojového panelu Dynon SkyView. Po napísaní celej práce môžeme zhodnotiť, že sme všetky stanovené ciele splnili.

V rámci inžinierskeho štúdia by sme chceli pokračovať v riešení danej problematiky a venovať sa jej podrobnejšie.

Pod'akovanie

Táto publikácia vznikla vďaka podpore v rámci Operačného programu Integrovaná infraštruktúra pre projekt: "Výskum a vývoj bezkontaktných metód pre získavanie geopriestorových údajov za účelom monitoringu lesa pre zefektívnenie manažmentu lesa a zvýšenie ochrany lesov", kód ITMS 313011V465, spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.

Referencie

- [1] ČIŽMÁR, J. a TRUBAČ, M.: Přístrojové vybavení (022 00). Brno : Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2006. s. 230. ISBN 80-7204-445-1.
- [2] KANDERA, B.: Letecké přístroje. Bratislava : Dolis s.r.o., 2015. s. 205. ISBN 978-80-8181-017-6.
- [3] U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION, FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION: Instrument flying handbook (FAA-H-8083-15B). New York : Skyhorse Publishing, Inc., 2017. s. 368. ISBN 978-1-5107-2546-1.
- [4] BESSETTE, B.: Glass Cockpit Principles. An Introduction into Aircraft Glass Cockpit Technology. 2021 Edition. Brétigny-sur-Orge : Amazon, 2021. s. 219. ISBN 9798497684919.
- [5] WOOD, Andrew (2022). AeroToolbox. Online. Dostupné na: <https://aerotoolbox.com/pitot-static-system/> [cit. 2024-01-02]
- [6] Autorský kolektív: Učebnice pilota 2016. Příbram : Svět křidel, 2016. s. 408. ISBN 978-80-87567-89-0.
- [7] AVIATIONEXAM, s.r.o.: Aviationexam Test Prep Edition 2014. Instrumentation 022. Praha : International Wings s.r.o., 2013. s. 246. ISBN 978-80-87014-57-8.
- [8] SKYbrary (bez dáta). SKYbrary. Online. Dostupné na: <https://skybrary.aero/articles/gyromagnetic-compass> [cit. 2024-01-03]
- [9] Take Flight Aviation (2023). TakeFlightToc. Online. Dostupné na: <https://www.takeflighttoc.com/2022-diamond-da42-version-vi-for-sale/> [cit. 2024-01-23]
- [10] ZEMAN, K.: Metodika pro psaní bakalářských a diplomových prací na Národohospodářské fakultě Vysoké školy ekonomické v Praze. Praha : Vysoká škola ekonomická v Praze, 2013. s. 30.
- [11] UHEREKOVÁ, M.: Manuál k spracovaniu záverečnej práce. Dubnica nad Váhom : Vysoká škola DTI, 2017. s. 34.
- [12] ES systems (2023). ES systems. Online. Dostupné na: <https://esenssys.com/comprehensive-guide-to-mems-sensors/> [cit. 2024-04-06]
- [13] Pilot Institute (2021). Pilot Institute. Online. Dostupné na: <https://pilotinstitute.com/glass-vs-traditional-cockpit/> [cit. 2024-04-05]
- [14] TEGLER, Jan (2003). Robb Report. Online. Dostupné na: <https://robbreport.com/motors/aviation/the-best-of-the-best-2003-personal-aircraft-cirrus-sr22-239831/> [cit. 2024-04-05]
- [15] GARMIN Ltd.: GARMIN G1000 Integrated Flight Deck Pilot's Guide – Cessna Nav III.. Southampton : Garmin Ltd., 2013. s. 662. ISBN 190-00498-08.
- [16] DENDIS, T. a KANDERA, B.: Letecké přístroje II. Žilina : EDIS, 2001. s. 150. ISBN 80-7100-824-9.
- [17] SKYbrary (bez dáta). SKYbrary. Online. Dostupné na: <https://skybrary.aero/articles/electronic-flight-instrument-system-efis> [cit. 2024-01-30]
- [18] Pinterest (bez dáta). Pinterest. Online. Dostupné na: <https://www.pinterest.ca/pin/garmin-g1000-glass-cockpit-primary-flight-display-pfd—20125529568287472/> [cit. 2024-01-30]
- [19] Spune (2021). Spune. Online. Dostupné na: <https://maxiload.amebaownd.com/posts/19634494/> [cit. 2024-01-30]
- [20] PALLETT, E. H. J.: Aircraft Instruments: Principles and Applications. 3rd edition. Londýn : Pearson Education Ltd., 2009. s. 432. ISBN 978-81-317-2813-0.
- [21] WYATT, D.: Aircraft Flight Instruments and Guidance Systems: Principles, Operations and Maintenance. Londýn : Routledge, 2015. s. 273. ISBN 978-0-415-70683-4.
- [22] Collins (bez dáta). Collins Dictionary. Online. Dostupné na: <https://www.collinsdictionary.com/dictionary/english/aerometer> [cit. 2024-02-02]

- [23] 123LED (bez dáta). 123LED. Online. Dostupné na: <https://www.123led.sk/led-diody-technicke-udaje/> [cit. 2024-04-07]
- [24] ErezS (2004). Jetphotos. Online. Dostupné na: <https://www.jetphotos.com/photo/247462> [cit. 2024-02-02]
- [25] MANTOUDIS, Michael (1984). Airlines. Online. Dostupné na: <https://www.airliners.net/photo/Hapag-Lloyd/Boeing-737-2/805913> [cit. 2024-02-02]
- [26] Pilot Institute (2023). Pilot Institute. Online. Dostupné na: <https://pilotinstitute.com/flight-instruments-explained/> [cit. 2024-02-03]
- [27] Steam (2020). Steam community. Online. Dostupné na: <https://steamcommunity.com/sharedfiles/filedetails/?l=german&id=2257121918> [cit. 2024-02-03]
- [28] MONTGOMERY, Jeff, Dr.: Aerospace: The Journey of Flight. 3rd edition. Alabama : Civil Air Patrol National Headquarters Maxwell Air Force Base, 2013. s. 682. ISBN 9780050015148.