

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV POČÍTAČOVÉ GRAFIKY A MULTIMÉDIÍ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY
DEPARTMENT OF COMPUTER GRAPHICS AND MULTIMEDIA

VIZUALIZACE LETOVÝCH DAT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

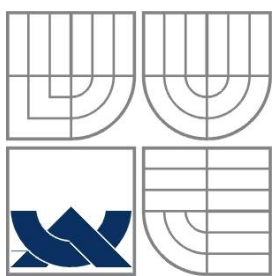
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

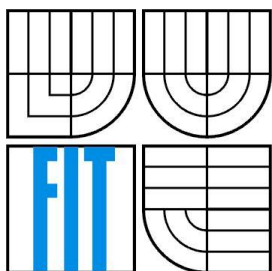
AUTHOR

Ondřej Burda

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV POČÍTAČOVÉ GRAFIKY A MULTIMÉDIÍ
FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY
DEPARTMENT OF COMPUTER GRAPHICS AND MULTIMEDIA

VIZUALIZACE LETOVÝCH DAT

FLIGHT DATA VISUALISATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ondřej Burda

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Peter Chudý, Ph.D. MBA

BRNO 2013

Abstrakt

Práce se zabývá problematikou vizualizace letových dat v pilotní kabině. Popisuje základní letové veličiny a způsob jejich zobrazení pomocí analogových přístrojů a moderních integrovaných displejů. V práci je popsán návrh dvojice integrovaných displejů pro malý sportovní letoun a jejich implementace do simulátoru SimStar.

Abstract

This thesis is related to the visualization of flight data and describes the basic flight variables and their presentation using analog instruments and modern integrated displays. Description throughout the work is dedicated to design of a pair of integrated displays for light sport aircraft which were implemented into the 'SimStar' simulator.

Klíčová slova

letové displeje, letové přístroje, vizualizace, energetické stavy, avionické systémy, Aeroworks

Keywords

flight displays, flight instruments, visualization, energy states, avionics systems, Aeroworks

Citace

Ondřej Burda: Vizualizace letových dat, bakalářská práce, Brno, FIT VUT v Brně, 2013

Vizualizace letových dat

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením pana Ing. Petra Chudého, Ph.D. MBA. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

.....
Ondřej Burda
15.5.2013

Poděkování

Děkuji všem, kteří mi pomohli při psaní této práce a zejména panu Ing. Petrovi Chudému, Ph.D. MBA a ostatním členům týmu Aeroworks za čas a cenné rady, které mi v průběhu práce věnovali. Dále také děkuji rodičům a přítelkyni za podporu během studia.

© Ondřej Burda, 2013

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
1.1 Použité zkratky	2
2 Historie a vývoj.....	3
2.1 1900 - 1950	3
2.2 1950 - současnost.....	4
3 Letové přístroje	9
3.1 Přístroje zobrazující letové veličiny	10
3.2 Přístroje zobrazující motorové veličiny	14
3.3 Integrované displeje.....	17
4 Energetické stavy letounu	21
4.1 Využití při pilotáži	22
5 Návrh aplikace	23
5.1 Základní rysy aplikace.....	23
5.2 Prvotní návrh	24
5.3 Vizualizace energetických stavů.....	24
5.4 Výsledný návrh PFD.....	26
5.5 Výsledný návrh MFD	27
6 Implementace	29
6.1 Simulátor	29
6.2 Síťová komunikace	30
6.3 Architektura aplikace.....	31
6.4 Implementace PFD	32
6.5 Implementace MFD	33
6.6 Implementace COM.....	35
7 Testování.....	36
8 Závěr	37
9 Literatura.....	38
Příloha A – popis PFD.....	40
Příloha B – popis MFD.....	41
Příloha C – Obsah CD a spuštění aplikace	42

1 Úvod

Tato práce pojednává o vizualizaci letových dat a letových fyzikálních veličin v pilotní kabině letounu. Zvyšující se výkon a vyspělost výpočetní techniky umožnila nové přístupy v této oblasti, kdy došlo k nahrazení klasických mechanických přístrojů za vestavěné displeje. To umožnilo nové způsoby vizualizace veličin a také integraci nových údajů, jejichž zobrazení bylo v minulosti těžko myslitelné. Tento pokrok směřuje ke snížení zatížení pilota, jeho větší informovanosti o letové situaci a tím i celkovému zvýšení bezpečnosti letu.

V práci se v druhé kapitole seznámíme s vývojem rozhraní palubních zobrazovacích systémů a to od prvních motorových strojů až po moderní letouny, vybavené digitální avionikou. Tato kapitola slouží jako úvod do problematiky leteckých přístrojů v pilotní kabině. Třetí kapitola se věnuje rozboru jednotlivých přístrojů, se kterými se setkáme v určité podobě v každém letadle. Jsou probrány principy měření veličin i jejich následná prezentace pilotovi. Kapitola se věnuje také přístrojům zobrazující údaje motorové jednotky. Závěr je pak věnován způsobu prezentace dat na integrovaných displejích. Čtvrtá kapitola popisuje teoretický základ práce s energetickými stavy v průběhu letu a popisuje způsoby, jak těchto znalostí využít při pilotáži. Pátá kapitola popisuje návrh aplikace a shrnuje očekávané vlastnosti systému. Tato kapitola také obsahuje rozbor výsledné podoby vizualizace. V šesté kapitole je aplikace popsána z hlediska její implementace. Poslední kapitola shrnuje výsledek práce a ukazuje další možné směry vývoje.

1.1 Použité zkratky

<i>zkratka</i>	<i>angličtina</i>	<i>čeština</i>
ADI	Attitude Direction Indicator	umělý horizont
CRT	Cathode Ray Tube	katodová trubice
FPA	Flight Path Angle	úhel dráhy letu
GPS	Global Positioning System	globální polohový systém
HSI	Horizontal Situation Indicator	ukazatel horizontální situace
HUD	Head Up Display	průhledový displej
IAS	Indicated Air Speed	indikovaná vzdušná rychlost
ILS	Instrument Landing System	systém přistání dle přístrojů
IR	Infra Red	infračervené
LCD	Liquid Crystal Display	displej z tekutých krystalů
MFD	Multi-Function Display	multifunkční displej
PFD	Primary Flight Display	primární letový displej
PFPA	Potential Flight Path Angle	potenciální úhel dráhy letu
QFE	barometric press adjusted to airfield level	barometrický tlak v úrovni letiště
QNH	barometric press adjusted to sea level	barometrický tlak u hladiny moře
SVS	Synthetic Vision System	systém syntetického vidění
TAS	True Air Speed	pravá vzdušná rychlost
VPD	-	vzletová přistávací dráha

2 Historie a vývoj

Pro lepší pochopení problematiky orientace pilota ve vzduchu a jeho informovanosti o letových parametrech bude v této kapitole stručně shrnut vývoj přístrojové desky od prvních motorových strojů po letouny poslední generace. Historické údaje vycházejí z [1], [2] a [3].

2.1 1900 - 1950

Úloha palubních přístrojů v letectví je nepopiratelná. Již historicky první motorový letoun – Flyer bratří Wrightů z roku 1903 nesl primitivní přístroje. Jednalo se o otáčkoměr motoru a stopky. Dále anemometr, tedy přístroj na měření rychlosti větru, který zde byl ale použit pro měření rychlosti letounu. Před pilotem byla také volně upevněna struna, která pak určovala úhel proudění vzduchu a tím pomáhala pilotovi s řízením stroje. Tento indikátor byl využíván rovněž dalšími piloty, došlo také k rozšíření pomocí látkové stuhy. Později se začaly používat přístroje na bázi kyvadla, které dokázaly určit přibližné hodnoty klonění a klopení při stabilním letu. Nicméně první přístroje nebyly dostatečně přesné a piloti se učili létat spíše pomocí zraku a ostatních vjemů lidského těla. Přístroje pak používali k potvrzení svého úsudku. Větší důraz se kladl na motorové přístroje, protože tehdejší motory byly svými výkony na hranici bezpečného letu. Proto bylo důležité sledovat jejich parametry, jelikož i malá výchylka mohla znamenat problémy. Dále začaly být používány přístroje, pracující na základě tlaku vzduchu, tedy barometrický výškoměr a rychloměr, i když v mnohem primitivnější formě, než jakou známe dnes.



Obr. 2.1: Kabina letounu Blériot [3]

Dvacátá léta přinesla revoluci v podobě přístrojů založených na setrvačnicku neboli gyroskopu. Tyto přístroje informují pilota o orientaci letounu v prostoru a dovozovali delší navigační lety. O jejich rozšíření se postaral Elmer Sperry a společně s Jamesem Doolittlem posunuli leteckou avioniku značně kupředu. Jejich snažení vyvrcholilo v roce 1929 prvním letem s úspěšným přistáním jen za pomoci přístrojů a bez výhledu z kabiny. Kokpit stroje použitého k tomuto letu vidíme na obrázku 2.2. Také se objevuje Kollsmanův výškoměr s radikálně zvýšenou přesností oproti stávajícím typům. Postupně byla opuštěna mylná představa, že se člověk dokáže orientovat ve vzdušném prostoru jen pomocí vestibulárního aparátu a přístroje začaly hrát větší roli již při pilotním výcviku.



Obr. 2.2: Pilotní deska letounu Consolidated NY-2 [3]

Třicátá léta a období druhé světové války znamenaly rychlý vývoj na poli letecké avioniky. Z důvodů potřeby přesnější navigace a provozu v noci začínají vznikat navigační systémy založené na rádiových vlnách. Objevují se nové přístroje založené na radiovém signálu, jako je radiokompas. S tím, jak se zvyšoval počet prvků v kabině, začal být pro piloty složitější přechod mezi jednotlivými typy letounů. V roce 1937 se britská RAF rozhodla zavést určité sjednocení, výsledek je pak znám jako „basic six“, tedy šestice přístrojů ve dvou řadách, která zabezpečuje navigaci podmínkách snížené viditelnosti. Tato přístrojová sada byla ve stejném rozložení instalována do všech britských strojů a tím usnadnila pilotům přechod mezi jednotlivými typy. Uvedené rozložení přístrojů se pak stalo standardem v letectví pro dalších 20 let. Na obrázku 2.3 vidíme šestici v kokpitu britského stíhače Supermarine Spitfire.



Obr. 2.3: Šest základních přístrojů [3]

2.2 1950 - současnost

Poválečné období charakterizuje nástup proudových letounů a s ním i požadavky na změnu rozložení přístrojové desky. V 50. letech vzešel od U. S. Air Force nový standard rozložení, známý jako „T arrangement“. Umělý horizont je umístěn uprostřed, po jeho stranách se nachází rychloměr a výškoměr. Pod umělým horizontem pak najdeme ukazatel směru nebo HSI. Toto rozmístění je pak doplněno variometrem a zatáčkoměrem. Krom umístění přístrojů definoval nový standard také změnu zobrazení některých veličin z kruhového tvaru budíku na zobrazení sloupkové. Nové varianty přístrojů vznikly sloučením starších typů do jednoho přístroje, například funkce umělého horizontu a zatáčkoměru byla sloučena do ADI (viz kap. 3). S některými rozdíly pak tento koncept převzaly i

civilní stroje. Toto rozmístění je standardem dodnes a řídí se podle něj i zobrazení na integrovaných displejích. Na obrázku 2.4 vidíme rozložení základních přístrojů do tvaru písmene T.



Obr. 2.4: Rozložení do T [3]

V sedmdesátých a osmdesátých letech se se zvyšující komplexností strojů začal zvyšovat i počet přístrojů v pilotní kabině nad únosnou mez. Toto se týkalo především vícemotorových strojů. V NASA byl proveden výzkum v oblasti digitalizace stávajících přístrojů. Zobrazení pak probíhalo pomocí monochromatických CRT obrazovek. Nejprve se jednalo o nahrazení méně důležitých přístrojů, v případě armádních strojů pak šlo především o zobrazení výstupu palubního radiolokátoru. První civilní letoun s touto technologií byl McDonnell Douglas MD-80, ve kterém byla využita pro navigační počítač.



Obr. 2.5: Palubní deska letounu MD-80 [3]

Devadesátá léta až po současnost charakterizuje vzrůstající integrace displejů do palubních desek. Takovýto pilotní prostor bývá označován jako „glass cockpit“. Došlo k přechodu na LCD displeje, vyšší výkon palubních počítačů umožňuje kvalitnější a detailnější zobrazení. Většina přístrojů je již nahrazena displeji, nejdůležitější zůstávají v analogové podobě jen jako rezerva. Díky GPS a obdobným družicovým systémům se rozšiřují možnosti navigačních displejů.



Obr. 2.6: Palubní deska letounu Airbus A380 [3]

Na obrázku 2.7 vidíme kabinu stroje Lockheed C-5 Galaxy. Vlevo se nachází původní verze, vpravo pak její modernizovaná podoba, kde již vidíme využití integrovaných displejů. Můžeme si všimnout značného zprehlednění přístrojové desky.



Obr. 2.7: Původní a modernizovaný přístrojový panel stroje C-5 [3]

Po vzoru vojenských letadel se i v civilním sektoru začínají používat průhledové displeje (HUD), které má pilot v úrovni očí. Díky nim pilot vidí základní letové údaje bez toho, aby musel sklánět zrak a hledat je na palubní desce.



Obr. 2.8: Průhledový displej [3]

Výkon moderních systémů umožňuje syntetické zobrazení terénu (SVS), což značně ulehčuje pilotáž obzvlášť při zhoršené viditelnosti a také snižují pravděpodobnost srážky s terénem. Dalším rozšířením je také kombinace s obrazem snímaným pomocí IR kamery nebo mikrovlnného radaru.[4]

Všechny tyto modifikace značně zvyšují bezpečnost letu. Běžně se již můžeme setkat se skleněným kokpitem i v malých sportovních letounech. Na obrázku je palubní deska stroje Cessna 182 se zástavbou od firmy *Garmin*, vpravo pak syntetické zobrazení terénu.



Obr. 2.9: Zástavba integrovaných displejů a SVS [9]

Digitalizace se nevyhnula ani vojenským strojům. Použití multifunkčních displejů snižuje zátěž pilota a umožnila srozumitelnější výstup zbraňových a radiolokačních systémů. Na obrázku 2.10 vidíme původní kabinu ruského stroje Su-27 ze sedmdesátých let, založenou na analogových přístrojích. Vedle pak značně modernizovanou variantu s třemi multifunkčními LCD displeji.



Obr. 2.10: Původní a modernizovaná kabina letounu Su-27 [3]

Předvídat budoucí vzhled kabiny letounu je obtížné. Již nyní nám ale může napovědět přístrojový panel amerického stroje F-35, který je právě ve fázi testovacích letů a brzy bude zřejmě uveden do výzbroje hned několika států. Kabina se vyznačuje dotykovým displejem, což snižuje počet klasických ovládacích prvků. Některé nekritické funkce mohou být dokonce ovládány hlasovými příkazy. Další novinkou je absence HUD displeje, jehož původní prvky jsou nyní integrovány přímo do přilby pilota.



Obr. 2.11: Kabina letounu F-35 [3]

Možné směry ve vývoji přístrojové desky strojů budoucnosti ukazuje poslední obrázek. Jedná se o koncept futuristického stroje představený firmou *Thales*. Všimněme si absence většiny mechanických ovládacích prvků – avionika je ovládána dotykově prostřednictvím rozměrného displeje.



Obr. 2.12: Koncept futuristického kokpitu [3]

3 Letové přístroje

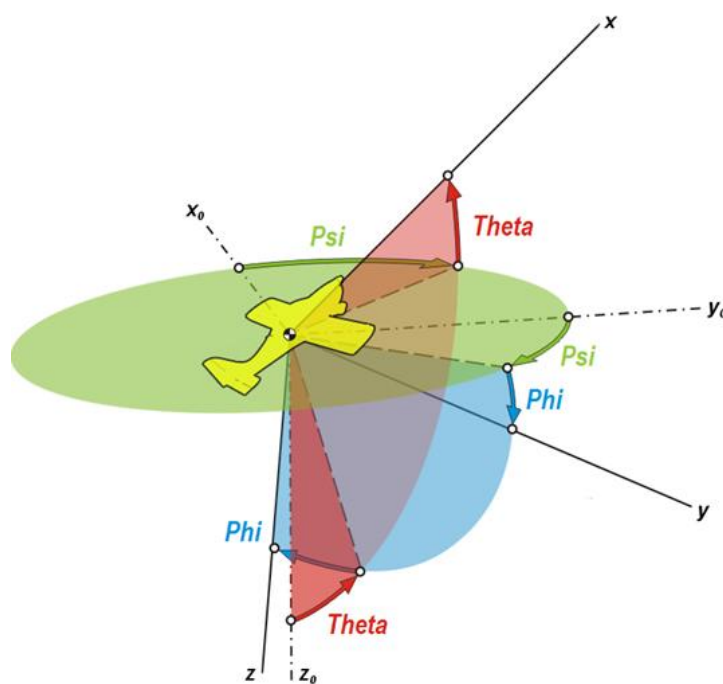
Jinou množinu přístrojů najdeme ve velkém dopravním letadle, sportovním ultralightu nebo v proudovém stíhači a různé může být i pojetí zobrazení informací na takových přístrojích. Nicméně určité elementární přístroje a přístupy zůstávají společné pro všechny druhy letadel i helikoptér. Těmto přístrojům zobrazujícím základní letové veličiny se věnuje první podkapitola, naopak v druhé se budeme věnovat rozboru přístrojů zobrazujících veličiny pohonné jednotky. Třetí podkapitola popisuje integrované letové displeje, zastupující funkci klasických přístrojů. Informace jsou čerpány z [5] a [6].

Obrázek 3.1 zobrazuje polohu letounu ve vzduchu vzhledem k dvěma souřadnicovým systémům. Systém s osami značenými x, y, z je souřadnicový systém letadla s počátkem v jeho těžišti. Druhý systém s osami značenými x_0, y_0, z_0 je souřadný systém Země, jehož počátek je přesunut do těžiště letadla. Letoun pak kolem svého těžiště vykonává tři základní rotační pohyby.

Klopení (pitch) – rotace letadla kolem osy y , úhel klopení je pak úhel mezi osou x a horizontální rovinou souřadnicového systému Země a je označován řeckým písmenem Θ (Theta). Této rotace je docíleno výchylkou výškového kormidla.

Klonění (roll) – rotace letadla kolem osy x , úhel klonění je pak úhel mezi osou y a horizontální rovinou souřadnicového systému Země a je označován řeckým písmenem Φ (Phi). Této rotace je docíleno výchylkou křidélek.

Bočení (yaw) – rotace letadla kolem osy z , úhel bočení je pak úhel mezi osou x_0 a projekcí osy x na horizontální rovinu souřadnicového systému Země a je označován řeckým písmenem Ψ (Psi). Této rotace je docíleno výchylkou směrovky.



Obr. 3.1: Pohybové úhly letadla [17]

3.1 Přístroje zobrazující letové veličiny

Výškoměr

Přístroj zobrazuje nadmořskou výšku letounu. Funguje na principu barometru a využívá faktu, že se stoupající výškou klesá tlak okolního vzduchu. Nejčastěji používané jednotky jsou metry nebo stopy. Pro korektní zobrazení výšky je potřeba nejprve výškoměr kalibrovat, tj. nastavit referenční tlak, pro který přístroj ukazuje nulovou výšku.

QNH – nastavuje se tlak u hladiny moře v dané oblasti

QFE – nastavuje se tlak na letišti

Na obrázku 3.2 vlevo vidíme klasické rozložení výškoměru, kde střední ručička zobrazuje stovky stop, krátká tisíce stop a dlouhá pak desítky tisíc. Vlevo dole je pak ovladač nastavení referenčního tlaku. Uprostřed a vpravo pak vidíme další typy výškoměrů s jiným počtem ručiček, případně i s posuvnou číselnou páskou zobrazující aktuální výšku.



Obr. 3.2: Výškoměr [7]

Dále se můžeme setkat s rádiovým (radarovým) výškoměrem. Funguje na principu vysílání rádiových vln pod letoun, které se odrazí od země a následně jsou zpátky zachyceny. Na základě znalosti časového zpoždění je pak vypočtena výška. V porovnání s barometrickým výškoměrem tak známe přesnou výšku přímo nad terénem. Mezi nevýhody naopak patří omezený dosah a nepřesné měření při větších příčných a podélných náklonech. V civilním letectví se tento typ výškoměru používá hlavně při přistávacím manévru. U vojenských strojů pak může sloužit například pro režim nízkého letu s kopírováním terénu.

Rychloměr

Přístroj určuje rychlost letounu vůči okolnímu vzduchu. Pracuje na principu porovnávání statického a dynamického tlaku vzduchu. Dynamický tlak je zjišťován pomocí pitotovy trubice, umístěné zpravidla na přídi nebo náběžné hraně křídla.

Nejčastěji používané jednotky jsou uzly nebo kilometry za hodinu a zpravidla bývá pilotovi zobrazena indikovaná rychlost (IAS). Některé typy rychloměrů ovšem mají stupnici i pro pravou vzdušnou rychlost (TAS). Stupnice obsahuje také barevné značení intervalů rychlosti. Bílá barva reprezentuje povolené rozsahy rychlostí s vysunutými klapkami. Zelená barva značí běžné cestovní rychlosti. Žlutá barva označuje rychlosti s nutnou zvýšenou pozorností pilota a červená znamená

maximální nepřekročitelnou rychlost. U proudových strojů se můžeme setkat i s integrací machmetru do rychloměru.



Obr. 3.3: Rychloměr [7]

Variometr

Variometr zobrazuje vertikální rychlost letounu, tedy relativní míru stoupání či klesání. Při klesání letounu stoupá tlak okolního vzduchu a při stoupání letounu naopak tlak klesá. Přístroj tedy sleduje změnu statického tlaku vzduchu. Použité jednotky jsou nejčastěji stopy za minutu nebo metry za sekundu. Přístroj je pro pilota důležitý hlavně pro udržení konstantní výšky během zatáček. Vertikální rychlost navíc není závislá jen na úhlu klopení, ale je ovlivněna například výkonem motoru. Ještě důležitější je úloha variometru ve větroních, kde pilotům pomáhá najít termické proudění. Přístroj je důležitý také pro piloty vrtulníku, jelikož při příliš rychlém klesání s nízkou dopřednou rychlostí se může na rotoru vytvořit tzv. vírový prstenec (vortex ring state), který způsobuje značný pokles tahu [8].



Obr. 3.4: Variometr [7]

Na obrázku 3.4 je klasické rozložení variometru. Při letu v konstantní výšce ukazuje ručička na 0. Během stoupání se ručička otáčí ve směru hodinových ručiček, při klesání naopak. Nikdy však o více, než 180°.

Umělý horizont

Informuje pilota o orientaci letounu vůči horizontu. Pro svou práci využívá gyroskop, který má stále stejnou orientaci vůči Zemskému povrchu. Jedná se o důležitý přístroj hlavně při letech za snížené viditelnosti.



Obr. 3.5: Umělý horizont [7]

Obrázek 3.5 ukazuje základní provedení přístroje. Uprostřed se nachází indikátor letounu a stupnice klopení. Dále je zobrazena linie horizontu, modrá barva znázorňuje kladné hodnoty klopení a tmavá barva hodnoty záporné. Na horním obvodu se pak nachází stupnice klonění.

Rozšířením funkcí standardního umělého horizontu vznikl přístroj ADI (attitude director indicator). Do přístroje byl integrován zatačkoměr a také směrový indikátor skládající se ze dvou úseček – pro vertikální a stranové navádění. Těch je pak využito nejen při navigaci dle letového plánu, ale také pro ILS přistání.



Obr. 3.6: ADI [7]

Zatáčkoměr

Přístroj zobrazuje směr a míru zatačení letounu. Přístroj funguje na principu gyroskopu. Stupnice označuje úhlovou rychlost zatačení a standardní hodnota je $3^\circ/\text{s}$. Časový údaj na zatačkoměru udává, za jak dlouho letoun provede zatačku o 360° při této rychlosti zatačení. Druhou funkcí je relativní příčný sklonoměr, který určuje kvalitu zatačky, tedy jestli je výkluzová nebo skluzová. Míru výkluzu/skluzu určuje vychýlení kuličky na stranu. Pilot se snaží toto korigovat směrovým kormidlem, protože nekvalitně provedená zatačka znamená zvýšený odpor a ztrátu energie.



Obr. 3.7: Zatáčkoměr [7]

Gyrokompas

Pro směrovou orientaci se používá klasický magnetický kompas, jehož nevýhodou je ovšem zobrazení zatížené chybou, pokud je letoun v náklonu nebo akceleruje.



Obr. 3.8: Kompas [7]

Proto je doplněn o přístroj, který není založen na magnetickém principu, nýbrž používá gyroskop – gyrokompas.



Obr. 3.9: Gyrokompas [7]

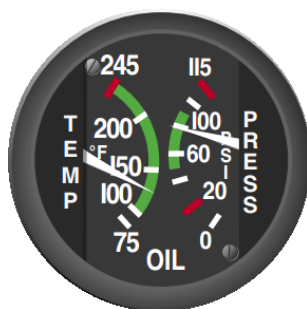
Symbol letadla zůstává stále orientován ve směru letu, otáčí se pouze stupnice. S ohledem na nedokonalost mechanismu setrvačnicku musí být gyrokompas pravidelně sesouhlasen s magnetickým kompasem. Nicméně i toto je u novějších přístrojů zautomatizováno pomocí magnetického senzoru. Postupem času došlo k rozšiřování funkcí přístroje, jednou z variant je HSI (horizontal situation indicator). K funkci kompasu přibyl také radiokompas, který umožňuje navigaci pomocí radiomajáků. Přístroj pak zobrazuje požadovaný kurz, odchylku od azimutu, vzdálenost k majáku a používá se také pro ILS přistání.



Obr. 3.10: HSI [7]

3.2 Přístroje zobrazující motorové veličiny

Na rozdíl od výše uvedených letových přístrojů jsou přístroje zobrazující motorové veličiny více uzpůsobené konkrétnímu typu motoru. Pilot jim za letu nemusí věnovat takovou pozornost, jako přístrojům letovým, proto bývají častěji umístěné na pohledově méně dostupných místech. Větší důraz je kladen na signalizaci nepovolených hodnot. Můžeme se setkat se sloučením několika měřených hodnot do jednoho přístroje.



Obr. 3.11: Zobrazení teploty a tlaku oleje v jednom přístroji [7]

Ukazatel plnicího tlaku

Přístroj se používá u pístových motorů a jedná se o nejdůležitější indikátor aktuálního výkonu pohonné jednotky. Zobrazuje tlak v sací soustavě motoru a to nejčastěji v palcích rtuť.



Obr. 3.12: Ukazatel plnicího tlaku [7]

Otáčkoměr

Přístroj zobrazuje většinou otáčky vrtule za minutu, ale můžeme se setkat i se zobrazením otáček motoru. Často bývá kombinován i s ukazatelem motorového času. U proudových motorů jsou zobrazovány otáčky jednotlivých částí kompresoru. Vyjádření je v procentech, kdy 100% značí maximální provozní hodnotu otáček. Přístroj je důležitý pro indikaci výkonu motorové jednotky, důležité je především sledovat příliš vysoké otáčky, které mohou vést k přetočení motoru. Svou úlohu hraje také pro optimální nastavení stavitelné vrtule.



Obr. 3.13: Otáčkoměr pístového a proudového motoru [7]

Ukazatele teplot a tlaků

Sledována bývá především teplota oleje a teplota válců, přístroj má značeny nebezpečné hodnoty teplot, které indikují problém s motorovou jednotkou. Zejména u proudových motorů se můžeme setkat také s ukazatelem teploty výstupních plynů.



Obr. 3.14: Ukazatel teploty oleje a výstupních plynů [7]

Dále se sleduje tlak provozních kapalin a to především oleje a paliva. Jejich mezní hodnoty mohou znamenat problém s olejovým okruhem nebo palivovou soustavou letounu. Přístrojový panel může obsahovat také ukazatel tlaku v hydraulické soustavě.



Obr. 3.15: Ukazatel tlaku oleje [7]

Ukazatel množství paliva

Informuje pilota o množství zbývajícího paliva v nádrži. Nejčastěji se udává v galonech, ale můžeme se setkat i s vyjádřením v jednotkách hmotnosti. Pokud má letoun více nádrží, měřiče jednotlivých nádrží se často integrují do jednoho přístroje.



Obr. 3.16: Palivoměr [7]

I když se netýkají přímo motorové jednotky, v oblasti motorových přístrojů se často nachází také měřiče elektrické sítě letounu.



Obr. 3.17: Ukazatel proudu a napětí [7]

3.3 Integrované displeje

V menších letounech se nejčastěji používá dvou obrazovek pro zobrazení. Přímě před pilotem se nachází primární letový display (PFD), zobrazující důležité letové informace. Vpravo od něj se pak nachází multifunkční letový display (MFD), zobrazující méně důležité údaje, klasicky navigační mapu a hodnoty motorových veličin.



Obr. 3.18: Zástavba systému Garmin 1000 [9]

Dva samostatné displeje jsou důležité v případě výpadku jednoho z nich. Poté je možné zobrazit všechny důležité údaje v úspornějším formátu na zbývajícím obrazovce. Nicméně v kabině zůstávají vždy zachovány ty nejdůležitější přístroje i v analogové formě jako rezerva.

Primární letový display v sobě integruje všechny základní letové přístroje z kapitoly 2.1. Zobrazení bude diskutováno na produktu firmy *Garmin*, nicméně všechny displeje mají rozložení velmi podobné a liší se jen v detailech. Pozadí má podobu analogickou s umělým horizontem včetně stupnic. Vlevo se nachází rychloměr, zobrazení hodnot ale probíhá na posuvné vertikální pásce, kde nižší hodnoty najdeme dole, vyšší hodnoty nahoře a aktuální hodnota se zobrazuje ve zvýrazněné středové sekci. Poslední číslice aktuální hodnoty se nemění skokově, ale plynule se posouvají stejně jako u analogových přístrojů. Rychloměr je také rozšířen o indikátor trendu rychlosti. Na displeji vpravo najdeme výškoměr, jehož zobrazení se výrazně neliší od rychloměru. K němu bývá přidružen variometr, který má také podobu vertikální pásky. Ta je ovšem nepohyblivá, naopak se příslušně pohybuje indikátor vertikální rychlosti. Ve spodní části se pak nachází ukazatel směru. Indikátory umožňují nastavení zářezek na zvolené hodnoty, které pak pilotovi pomáhají dodržet letový plán. Zatačkoměr je integrován do stupnice klonění (příčný relativní sklonoměr) a také do ukazatele směru (úhlová rychlost zatačení). Displej dále zobrazuje také informace o zaměřených radiomajácích, nastavení frekvence rádia a minimapu.



Obr. 3.19: Primární letový displej [9]

Modernější přístroje místo umělého horizontu mohou zobrazovat přímo syntetické zobrazení terénu, což značně ulehčuje pilotáž obzvláště při zhoršené viditelnosti a také snižují pravděpodobnost srážky s terénem.

Multifunkční letový displej obsahuje více módů zobrazení. Za letu nejčastěji používaným je navigační režim, kde je zobrazována mapa s orientačními body, pozice letounu, letiště, letový plán a další navigační údaje. Zpravidla bývá doplněna sekci motorové jednotky, kde se mohou nacházet také údaje o vyvážení kormidel, stavu podvozkové skupiny atd.



Obr. 3.20: Multifunkční displej [9]

Obrázek 3.20 ukazuje režim detailního pohledu na údaje motorové jednotky. Tentokrát se jedná o produkt firmy Avidyne [10]. Povšimněme si především měření teploty hlav a výstupních plynů pro jednotlivé válce motorů.



Obr. 3.21: Displej motorové jednotky [10]

Mezi další obvyklé režimy patří vytváření a editace letového plánu, mapa se stavem počasí, mapy letišť, přehled GPS systému, nastavení displeje apod.

U středně velkých obchodních letounů, kde se počítá s častějším letem dvou pilotů je rozložení displejů v kabině mírně odlišné. Oba piloti mají svůj vlastní PFD display a MFD se nachází uprostřed. Na obrázku kabina stroje Beechcraft King Air 350.



Obr. 3.22: Kabina letounu King Air 350 [3]

Následující obrázek 3.22 ukazuje využití integrovaných displejů u velkých civilních strojů. V pilotním prostoru Boeingu 737NG má každý pilot vlastní PFD, který je ovšem konzervativnějšího

charakteru a více odpovídá podobě analogových přístrojů. Jemu pak sekunduje navigační displej, zobrazující digitální HSI. Uprostřed se nachází displeje společné pro oba piloty. Zobrazují údaje o pohonných jednotkách, vyvážení kormidel, ustavení klapek a popis ostatních systému stroje.



Obr. 3.23: Kabina poslední generace Boeingu 737 [3]

Nevýhody integrovaných displejů můžeme vidět především v nutnosti předchozího seznámení pilota se specifikacemi systému, protože zobrazení dat se u každého modelu mírně liší. Další nevýhodou je zvýšená zátěž pilota při výpadku systému, jelikož se musí spolehnout jen na záložní přístroje, které navíc nejsou umístěny na optimálním místě.

4 Energetické stavy letounu

Tato kapitola čerpá podklady z publikací [11], [12] a [13]. Celková energie letounu se skládá ze dvou složek – z energie kinetické (rychlost) a energie potenciální (výška). Z principu zákona o zachování energie může docházet k transformaci potenciální energie na kinetickou a naopak. Jinými slovy můžeme získat výšku za cenu ztráty rychlosti nebo naopak získat rychlost při současném klesání. Nelze ovšem rychle snížit množství jedné ze složek bez současného navýšení druhé. Jedná se o nejrychlejší způsob změny obou veličin, které nelze dosáhnout pouhým výkonem motoru. Množství celkové energie letounu vyjadřuje následující vztah.

$$E = E_{pot} + E_{kin} = mgh + \frac{1}{2}mv^2 \quad (1)$$

Kdy m je hmotnost letounu, h jeho výška nad zemí a v jeho rychlost.

Pokud budeme letoun chápat jako systém, tak vstup energie do tohoto systému zajišťuje pohonná jednotka. Část energie ze systému vystupuje v důsledku ztrát způsobených odporem vzduchu. Transformaci potenciální a kinetické energie pak ovlivňuje poloha výškového kormidla, kdy při jeho neutrální poloze je veškerá nadbytečná energie transformována na kinetickou. Při přitažení se kinetická energie snižuje a dochází k nárůstu energie potenciální, naopak při potlačení se potenciální energie odebírá a dochází ke zvýšení energie kinetické. Toto je vyjádřeno rovnicí 2. [11]

$$\frac{T-O}{m} = \frac{\dot{v}}{g} + \gamma = \gamma_p \quad (2)$$

Kdy T je tah motoru, O je odpor vzduchu, m je hmotnost letounu, $\dot{v}$ je zrychlení v podélné ose, γ je úhel dráhy letu (FPA) a γ_p je potencionální úhel dráhy letu (PFPA). FPA udává úhel, jakým se letoun skutečně pohybuje a může se lišit od úhlu klopení letounu v závislosti na vertikální rychlosti a úhlu náběhu. PFPA pak udává úhel, kterým se letoun musí pohybovat, aby byla veškerá energie převáděna na potencionální, jinými slovy aby letoun neměnil svou rychlost. Jejich výpočet ukazují následující rovnice 3 a 4 [11]

$$\gamma = \dot{h} + \frac{1}{v} \quad (3)$$

$$\gamma_p = \gamma + \frac{\dot{v}}{g} \quad (4)$$

Kdy $\dot{h}$ je změna výšky v čase.

4.1 Využití při pilotáži

Celková energie letounu je jedna z nejdůležitějších veličin pro bezpečný let. Při nízké zásobě kinetické energie se letoun dostává blízko pádové rychlosti. Pokud je zároveň nízká i hodnota energie potenciální, tedy letoun se nachází nízko, pilot již nemá možnost transformovat potenciální energii na kinetickou potlačením a tím se vyhnout pádu.

Bylo již řečeno, že při vodorovném letu se hodnota kinetické energie zvyšuje společně s tahem pohonné jednotky. V reálném letounu ovšem při změně tahu dochází také ke změně klopení, a pokud není kompenzováno výškovým kormidlem, vede ke změně výšky a tedy i energie potenciální. K tomuto jevu dochází zejména ze dvou důvodů. Prvním z nich je, že vektor tahu neprochází přesně těžištěm letounu a dochází ke klopení, druhým pak změna rychlosti obtékání nosných ploch a výškového kormidla a tím i ke změně jejich účinnosti.

Mějme příklad, ve kterém pilot nebere v potaz provázanost složek energie letounu s řídicími prvky a chce změnit výšku beze změny rychlosti letu. Při přitažení řídicí páky začíná letoun stoupat, čímž zároveň začíná klesat rychlost. Dochází k přeměně kinetické energie na potenciální. Pro zachování konstantní rychlosti tedy pilot zvyšuje tah pohonné jednotky. Jak již ovšem bylo řečeno, toto zvýšení tahu má za následek i změnu klopení, tudíž se zvyšují obě složky energie letounu. Proto je potřeba změna polohy výškového kormidla, což znovu spouští celý cyklus korekcí. Naopak v situaci, kdy pilot má přehled o energii letounu a změně jednotlivých energetických složek, může ve stejné situaci nastavit výškové kormidlo i tah motoru takovým způsobem, aby výsledný energetický stav byl shodný s požadovanou změnou. Nepoužívá tedy striktně přístup, kdy výškové kormidlo řídí výšku a tah motoru rychlost, ale používá oba řídicí prvky ve vzájemném souladu s přihlédnutím k požadovaným energetickým změnám. Takový způsob pilotáže je efektivnější a vede i k vyšší bezpečnosti v mezních situacích. Pro jeho aplikaci je však nutno pilotovi prezentovat intuitivním způsobem.

5 Návrh aplikace

Úkolem práce bylo navrhnout a realizovat moderní způsob vizualizace letových dat pro pilota malého sportovního letounu. Jako cílový stroj byl zvolen Evektor SportStar [14], který je dostupný jako simulátor v laboratoři SimStar na VUT v Brně. Na obrázku 5.1 vidíme rovněž základní verzi palubní desky.



Obr. 5.1: Letoun Evektor Sportstar a jeho pilotní kabina [14]

5.1 Základní rysy aplikace

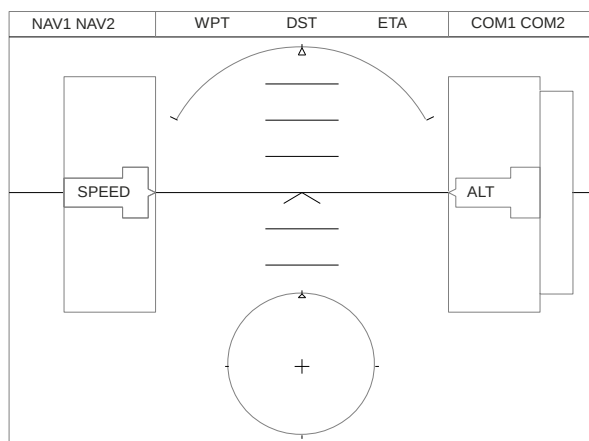
Vizualizace dat bude založena na získaných poznatcích z kapitol 2 a 3. Pro zobrazení letových veličin a navigačních údajů budou použity dva integrované displeje, umístěné na palubní desce před pilotem, které nahradí původní analogové indikátory. Velikost a rozlišení displejů je zvoleno s ohledem na simulátor, do kterého bude provedena implementace. Tyto hodnoty jsou ale běžné i v reálně nasazovaných aplikacích. Aplikace bude dále využívat dotykového ovládání, které podporují použité displeje. První displej bude zobrazovat především základní letová a navigační data, druhý displej bude sloužit k zobrazení motorových veličin a mapy s letovým plánem. Základní rysy aplikace lze shrnout takto:

- zobrazení pomocí dvou 12“ LCD displejů,
- rozlišení 1024x768 pixelů,
- dotykové ovládání,
- komunikace pomocí protokolu AW-COM,
- propojení displejů na úrovni předávání navigačních dat,
- základní vizualizace energetických stavů,
- zobrazení pomocí angloamerické měrné soustavy.

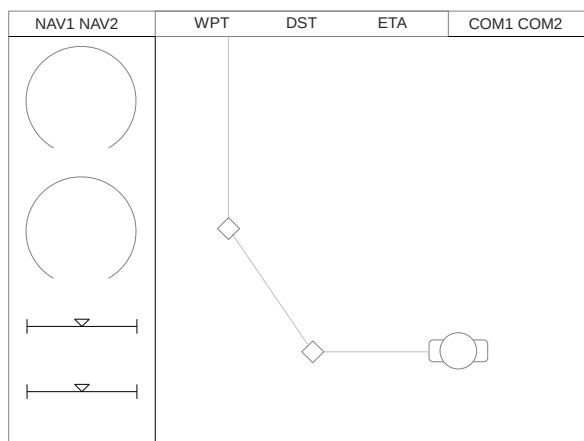
5.2 Prvotní návrh

Displej před pilotem bude využit jako PFD, bude v sobě integrovat všechny základní letecké přístroje. Navíc bude sloužit k vizualizaci navigačních dat a energetických stavů letounu a bude také signalizovat nepatřičné hodnoty letových dat. Druhý displej bude využit jako navigační, tedy bude zobrazovat mapu s letovým plánem a také informace o letištích. Letový plán bude sestaven z traťových bodů, které budou mít přednastavenou výšku a rychlost průletu bodem. Tyto údaje pak budou integrovány v zobrazení na PFD, aby se podle nich mohl pilot jednoduše řídit. Display bude obsahovat sekci zobrazující parametry motorové jednotky. Při grafickém návrhu bude přihlédnuto k dokumentu GAMA[15], který poskytuje doporučení pro standardizovaný návrh uživatelského rozhraní avionických systémů malých letadel.

Obrázky 5.2 a 5.3 ukazují prvotní návrh rozložení obou displejů. Uvedený vzhled se osvědčil a byl použit i u finální verze, došlo pouze k odstranění horního navigačního pruhu a jeho přesunutí do jinak nevyužitého prostoru spodních rohů.



Obr. 5.2: Prvotní návrh PFD



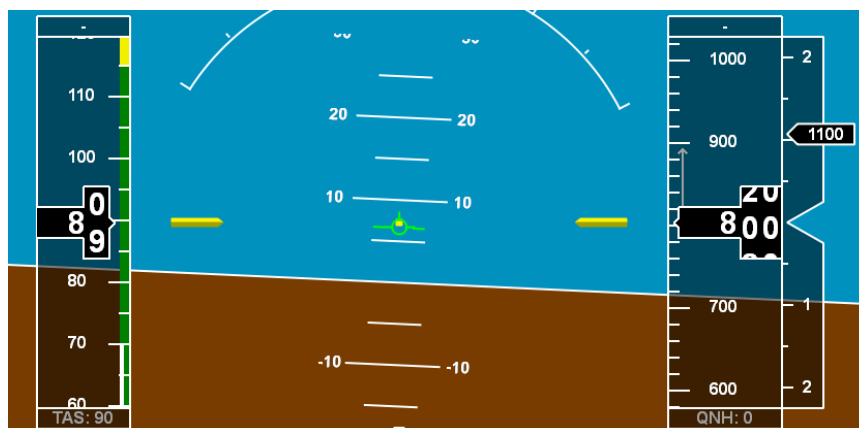
Obr. 5.3: Prvotní návrh MFD

5.3 Vizualizace energetických stavů

V kapitole 4 byly popsány energetické stavy letounu a výhody plynoucí z pilotáže při uvědomění si těchto zákonitostí. Pro podporu takového letu je nezbytné tyto hodnoty intuitivně prezentovat pilotovi. Proto bylo rozhodnuto hodnotu změny potenciální i kinetické energie v čase integrovat přímo do ukazatelů rychlosti a výšky. Změna jednotlivých složek energie pak není pilotovi prezentována jako abstraktní veličina, ale vidí ji přímo ve spojitosti s aktuální a předpokládanou rychlostí a výškou v čase. Ve spojení s navigačními zářkami zobrazenými na stejné stupnici je pak dosaženo přirozeného způsobu vizualizace změn energie. Dále je na stupnici klopení zobrazen FPA a PFPA v podobě značek, které se spojí v jediný symbol při letu podle PFPA, tedy letu s konstantní rychlostí. Tento přístup směřuje k používání výškového kormidla i přípustí motoru ve vzájemném souladu, namísto strategie odděleného používání obou prvků popsané v kapitole 4.1.

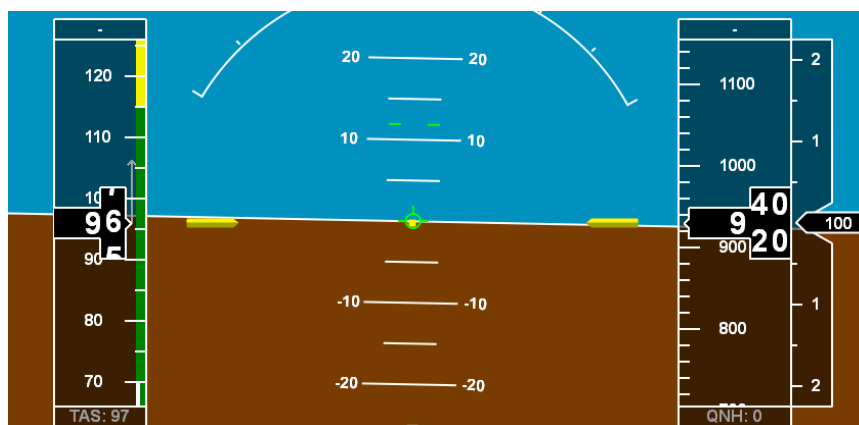
Následující obrázky prezentují výsledný způsob zobrazení. Změny energie jsou zobrazeny pomocí šedých šipek v ukazatelích rychlosti a výšky, FPA a PFPA pak symbolizují zelené značky uprostřed. Na obrázku 5.4 je zachyceno stoupání letounu s konstantní rychlostí. Vidíme, že šipky znázorňují

nárůst potenciální energie, přičemž kinetická energie zůstává neměnná. Konstantní rychlost v tomto případě zajišťuje let podle PFPA – značky se překrývají.

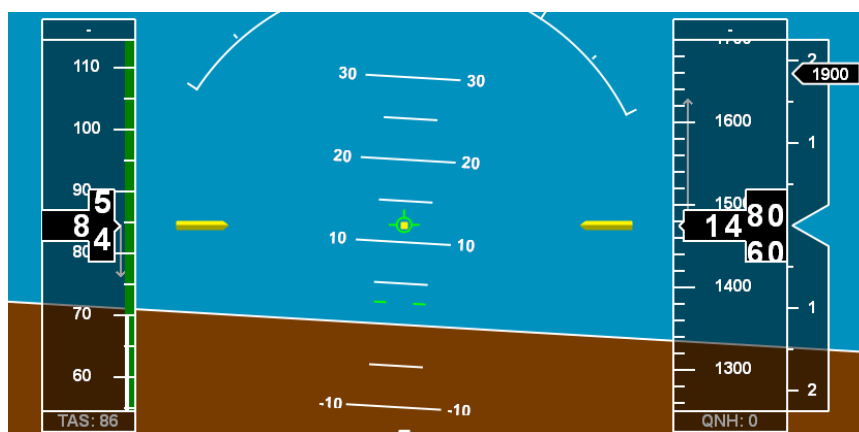


Obr. 5.4: Stoupání s konstantní rychlostí

Obrázek 5.5 zachycuje situaci, kdy dochází k nárůstu kinetické energie při zachování potenciální energie, obrázek 5.6 pak ukazuje převod kinetické energie na potenciální během stoupání se zpomalením. Právě vzájemná poloha značek FPA a PFPA udává pilotovi informace jak pracovat s ovládacími prvky pro zajištění konstantní rychlosti nebo konstantního úhlu klopení.



Obr. 5.5: Akcelerace



Obr. 5.6: Přeměna kinetické energie na potenciální

5.4 Výsledný návrh PFD

Pozadí displeje tvoří umělý horizont, který informuje pilota o poloze letounu vůči zemi. Astronomický horizont je znázorněn bílou přímkou po celé šířce displeje. Na umělý horizont navazují dvě stupnice, které informují pilota o hodnotách klonění a klopení letounu. Na stupnici klonění jsou vyznačeny předepsané úhly 10,20,30,45 a 60 stupňů. Indikátor klonění je doplněn o horizontálně posuvnou značku, která funguje jako relativní příčný sklonoměr a tedy symbolizuje pohyb kuličky v zatáčkoměru. Na stupnici klopení jsou vyznačeny úhly s intervalem deseti stupňů a každých pět stupňů je pak znázorněno pomocnou značkou. Pokud se dostane letoun do situace, kdy umělý horizont zobrazuje jen zem nebo naopak jen oblohu, zobrazí se na stupnici klopení značky ukazující směr k horizontu. Zeleně jsou znázorněny úhly PFPA a FPA. Druhý zmiňovaný je pak doplněn i o stranový úhel vybočení a tuto značku lze pak považovat za aktuální vektor letu.

Po stranách displeje jsou zobrazeny ukazatele výšky a rychlosti. Jsou tvořeny jednotným vizuálním stylem, kdy jsou hodnoty veličiny zobrazovány na pohyblivé pásce a aktuální hodnota je zobrazena staticky uprostřed ukazatele. Poslední číslice aktuální hodnoty se pak nemění skokově, ale dochází k plynulému posunu, který je znám z analogových přístrojů. Na stupnicích je také vyobrazen trend změny dané hodnoty v čase pomocí šedé šipky. Ta ukazuje pilotovi předpokládanou hodnotu veličiny za 5 vteřin. Stupnice rychloměru je rozdělena na barevné intervaly, které symbolizují rozsahy letových rychlostí. Při vysazení motoru, nebo letu na jeho minimální výkon je zvýrazněna rychlost, která je optimální pro plachtění letounu. Rychloměr udává indikovanou vzdušnou rychlost (IAS) a pod stupnicí je zobrazena přepočítaná pravá vzdušná rychlost (TAS). Výškoměr udává hodnotu vzhledem k danému referenčnímu tlaku, který je zobrazen pod stupnicí. Stupnice výškoměru je navíc doplněna o červenou rysku, která značí výšku terénu pod letounem. Nad ukazateli jsou číselně zobrazeny údaje o nařízené rychlosti a výšce v aktuálním bodě letového plánu. Tyto hodnoty jsou naznačeny i přímo na stupnicích pomocí zarážek.

Na výškoměr přímo navazuje variometr, který je umístěn na jeho pravé straně. Jeho stupnice je pevná a po ní se pohybuje indikátor v rozsahu -2000 až 2000 stop za minutu. Uvnitř indikátoru je zobrazována hodnota vertikální rychlosti bez ohledu na tento rozsah.

Ve spodní části se nachází ukazatel směru. Indikátor má pevnou polohu a kruhová stupnice pod ním je otočná. I zde je zobrazen trend změny směru pomocí šedého oblouku vystupujícího z indikátoru. Dále je šipkou znázorněn kurz ke zvolenému traťovému bodu. Posuvný střed šipky pak udává stranovou odchylku od plánované letové trasy.

Na displeji se dále nachází informační panely. Panel vlevo informuje o navigačních veličinách. Je zobrazen aktuální směr letu, zvolený bod letového plánu společně se vzdáleností a kurzu k tomuto bodu a předpokládaná doba letu. Nad tímto panelem se nachází tlačítko pro změnu aktuálního letového bodu a lze jím i celou navigaci vypnout. Panel vpravo zobrazuje čas a teplotu okolního vzduchu, tlačítka nad ním pak slouží k ovládání měřítka mapy na MFD. Pod rychloměrem jsou pilotovi zobrazována upozornění o nepatřičném stavu letounu.



Obr. 5.7: Výsledná podoba PFD

5.5 Výsledný návrh MFD

Nejbližše pilotovi, tedy na levém okraji displeje se nachází ukazatele motorových údajů. Jejich podoba je pro přehlednost blízká analogovým ukazatelům. Ukazatel výkonu je koncipován jako kruhový a výkon je zobrazován v procentech. Po překročení nominálního výkonu, tedy 100%, je pilot upozorněn na tuto hodnotu změnou barvy ukazatele a popisku na červenou. Na stejném principu pak funguje ukazatel otáček vrtule, zobrazení ovšem již není procentuální, ale zobrazují se otáčky za minutu. Další ukazatele jsou koncipovány jako posuvné, kdy se horizontálně pohybuje klínový indikátor po stupnici, která zároveň zobrazuje přípustné a nebezpečné intervaly hodnot. Jedná se o ukazatel průtoku paliva, ukazatel teploty a tlaku oleje a ukazatel stavu palivových nádrží. Ukazatel paliva se od ostatních liší použitím dvou separátních indikátorů na jedné stupnici, které zobrazují stav každé ze dvou nádrží letounu. Podobně jako u kruhových ukazatelů i zde dojde k červenému zabarvení popisku při nebezpečných hodnotách veličin. Intervaly přípustných hodnot vycházejí z manuálu letounu.

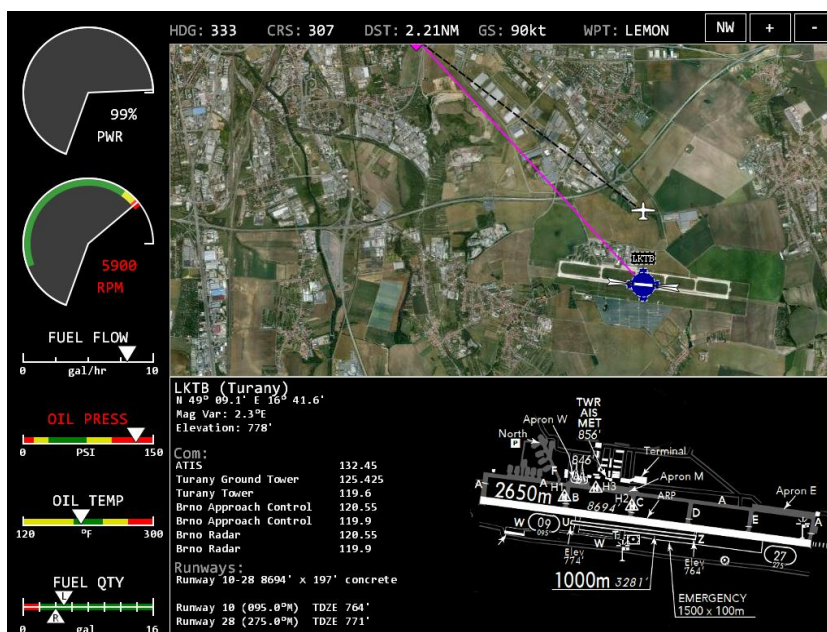
Horní pruh je využit jako navigační panel, který zobrazuje údaje vztahující se k právě zvolenému traťovému bodu. Je zobrazen název bodu, aktuální směr a směr k zvolenému bodu (kurz), dále vzdálenost od bodu a také rychlost vůči zemi. Panel je pak doplněn identickou trojicí tlačítek, která se nacházejí na PFD pro možnost ovládání mapy druhým pilotem.

Na zbývající ploše displeje je zobrazena mapa, na které je symbolizováno aktuální umístění letounu a letový plán skládající se z traťových bodů, propojených úsečkami. Dále jsou na mapě zobrazeny letiště, včetně naznačení směru VPD a přibližovacích vektorů k nim. Po kliknutí na letiště je zobrazen další panel, který zobrazuje informace o právě zvoleném letišti. Kromě informací o umístění letiště jsou zobrazeny komunikační frekvence letiště, údaje o povrchu, směru a délce VPD a také plán letiště včetně pojezdových drah.

Obrázek 5.8 ukazuje výsledný vzhled MFD. Vidíme, že letoun se pohybuje v okolí letiště Brno Tuřany a ukazatele otáček a tlaku oleje ukazují hraniční hodnoty. Obrázek 5.9 pak ukazuje stejnou situaci včetně zobrazení informací o letišti.



Obr. 5.8: Výsledná podoba MFD



Obr. 5.9: Zobrazení informačního panelu s letištěm

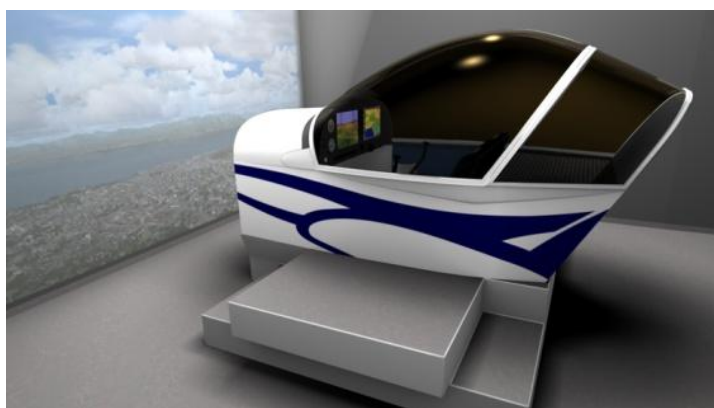
6 Implementace

Tato kapitola se zabývá implementací dvojice displejů navržených v předchozí kapitole. Je definováno implementační prostředí, tedy simulátor, jehož jádro dodává letové veličiny k vizualizaci a v jehož pilotní kabině jsou umístěny samotné displeje a také je popsán související komunikační protokol, který zabezpečuje výměnu dat mezi simulátorem a displeji. Dále je popsána architektura samotné aplikace, její jednotlivé třídy a vztahy mezi nimi.

6.1 Simulátor

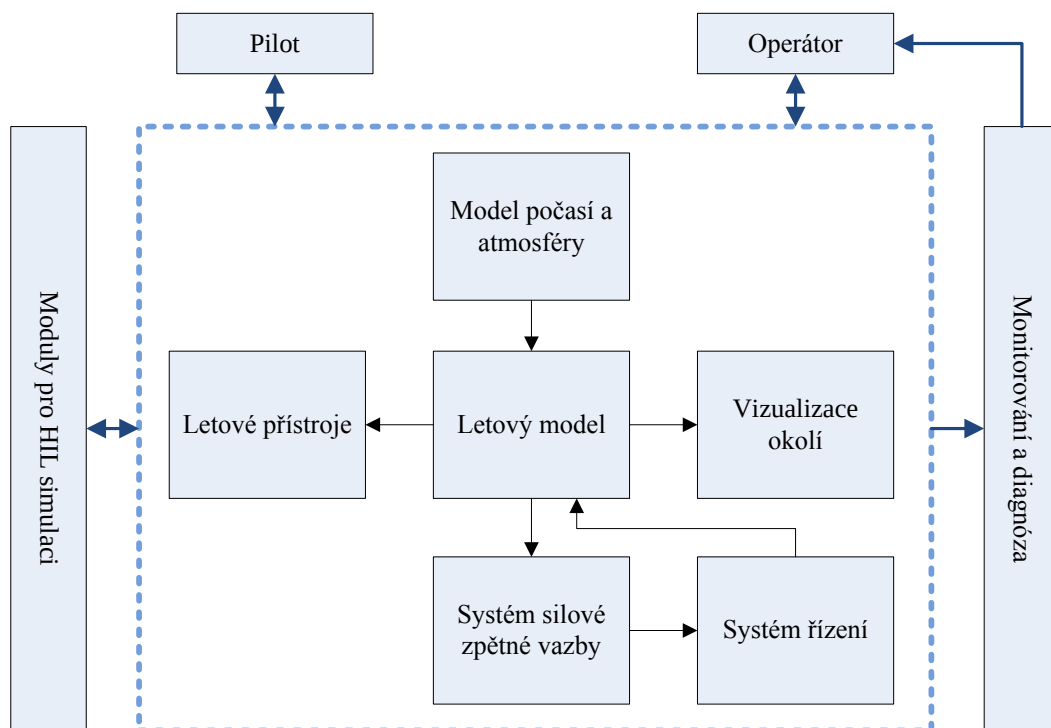
Laboratoř SimStar[16] slouží k výzkumu a vývoji avionických systémů. Je založena na kabině letounu Evektor SportStar, projekčním plátně a zvukovém systému. Celý systém je řízen pomocí dvou počítačů. První z nich zabezpečuje samotné simulační jádro a grafický výstup simulátoru. Druhý počítač slouží ke spouštění aplikací pracujících s displeji v kabině. Oba stroje jsou propojeny ethernetovou sítí. Grafické výstupy ze simulátoru i displejů jsou pak vyvedeny i do místnosti operátora.

Na palubní desce jsou oproti sériovému stroji zabudovány dva dotykové LCD displeje, jako záložní přístroje pak slouží analogové indikátory rychlosti a výšky. Pilot má k dispozici standardní ovládací prvky v podobě kniplu, pedálů směrového kormidla, ovládání motoru, klapky apod. Pomocí aktuátorů je zajištěna silová zpětná vazba na kniplu a pedálech, což umožňuje simulovat síly na ovládacích prvcích letounu dle aktuálních letových parametrů, povětrnostních podmínek a velikosti vychylek. Celý systém řízení může simulovat jak klasické mechanické propojení ovládacích prvků pomocí táhel a lanek, tak i elektroimpulzní systémy fly-by-wire včetně jejich umělé stabilizace. Modulární architektura simulátoru umožňuje integraci různých letových modelů. Tyto dynamické modely mohou být výstupem z Matlab/Simulink, nebo jako samostatné XML soubory. Architektura také podporuje hardware-in-the-loop simulaci, kdy je umožněno v systému experimentovat s reálnými avionickými přístroji a jejich vstupní či výstupní data zpracovávat simulátorem.[17]



Obr. 6.1: Simulátor SimStar [16]

Obrázek 6.2 znázorňuje architekturu simulátoru, jeho jednotlivé subsystemy a vazby mezi nimi.



Obr. 6.2: Architektura simulátoru

6.2 Síťová komunikace

Samotná komunikace mezi simulátorem a aplikací je vedena pomocí systému AW-COM[18], který byl v laboratoři vyvinut. Je postaven na architektuře klient-server nad protokolem TCP/IP. Samotný server je modulárního charakteru. Jeho hlavní funkcí je obsluhovat klientská zařízení, tedy hlavně připojené displeje, případně další potenciální zařízení. Další moduly se starají o extrakci dat ze simulačních jader, případně z externích senzorů. Samotná komunikace pak probíhá pomocí textového protokolu, který umožňuje přenášet všechny potřebné letové veličiny a to oběma směry. Při svém běhu se aplikace periodicky dotazuje serveru na hodnoty letových veličin a po jejich zpracování dochází k překreslení displejů.

Protokol přenáší letové veličiny ve zprávě typu **DATA**. V jedné zprávě je možno přenášet několik veličin a jejich hodnoty současně. Formát zprávy je následující:

Hlavička	Obsah	Ukončení
DATA	:veličina:hodnota:	END

Dalším typem zprávy je **GET**, který slouží k získání informací o letových veličinách. Je možno požádat o jednu i více konkrétních veličin, ale také o skupinu konkrétních dat vztahující se například k motorové jednotce atd.

Hlavička	Obsah	Ukončení
GET:DATA	:veličina:	END

Hlavička	Obsah	Ukončení
GET	:skupina:	END

Posledním typem zprávy je **SET**, který je určen k zasílání hodnot směrem od klienta k serveru. Typickým využitím může být například nastavení referenčního tlaku vzduchu na displeji a následně zaslání této hodnoty simulačnímu jádru.

Hlavička	Obsah	Ukončení
SET	:veličina:hodnota:	END

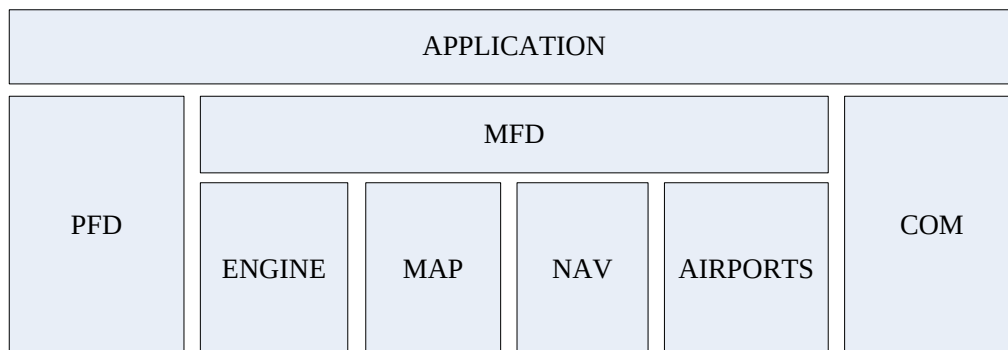
Všechny hodnoty veličin jsou vždy vyjádřeny jako desetinná čísla s přesností na šest desetinných míst.

6.3 Architektura aplikace

Aplikace byla napsána v jazyce C++ a bylo použito Qt Frameworku. Ten se vyznačuje jednoduchou portací na celou řadu platforem. Jeho hlavní využití se nacházelo v oblasti samotného vykreslování a síťového kódu.

Na obrázku 6.3 je naznačena architektura aplikace. Nejvyšší vrstva se stará o inicializaci a propojení všech nižších komponent. Třída PFD reprezentuje primární letový displej. Zapouzdřuje aktuální hodnoty letových veličin a následně se stará o jejich vykreslení. Třída MFD reprezentuje multifunkční displej. Sama o sobě se nepodílí na vykreslování, ale řídí a propojuje podřízené komponenty, z kterých se displej skládá. Jedná se o panel motorové jednotky, mapu s letovým plánem, panel s navigačními daty a panel zobrazující podrobnosti o zvoleném letišti. Třídy PFD a MFD jsou propojeny na úrovni předávání navigačních dat týkajících se právě zvoleného bodu letového plánu, které se zobrazují na obou displejích. Třída COM se pak stará o síťovou komunikaci se serverem. Z přijatých dat pak extrahuje letové údaje a posílá je třídám PFD a MFD.

Po spuštění aplikace dochází k vytvoření objektů zmíněných tříd, jejich propojení a inicializaci. Následně je načten konfigurační soubor a je spuštěn hlavní časovač. Ten periodicky volá funkce třídy COM pro připojení na server. Pokud je spojení úspěšné, dojde k přenosu dat a tyto jsou následně vloženy do objektů tříd PFD a MFD a je požádáno o jejich překreslení.



Obr. 6.3: Architektura aplikace

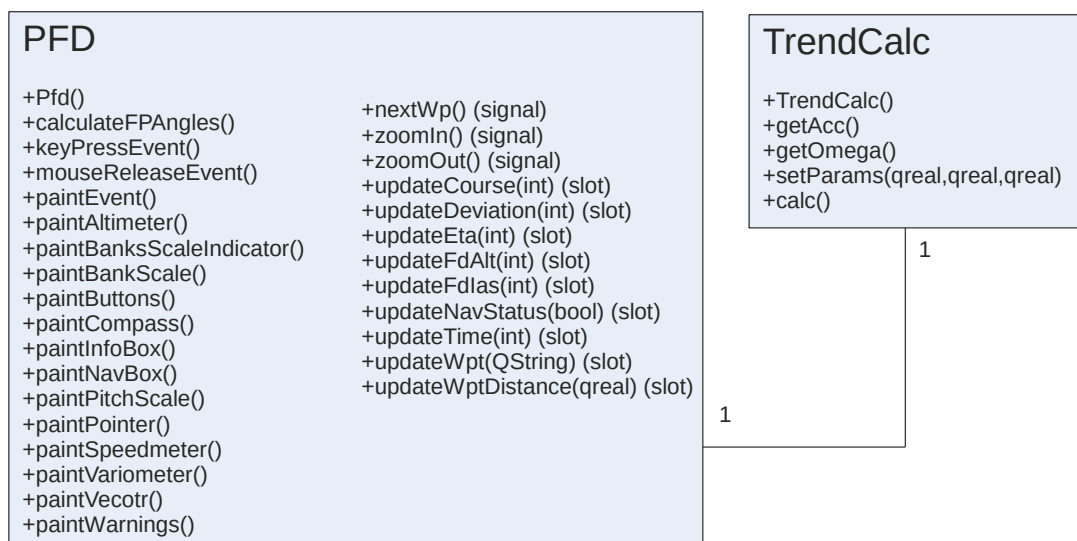
6.4 Implementace PFD

Základem třídy PFD jsou metody s prefixem `paint`, které provádějí vykreslování jednotlivých komponent displeje (výškoměr, kompas, atd.). Informace pro vykreslování jsou čerpány ze sady veřejných proměnných, ve kterých jsou uloženy aktuální hodnoty letových veličin a ze sady privátních proměnných, které obsahují informace o barvách, rozměrech a dalších grafických vlastnostech vykreslovaných komponent. Tyto metody jsou pak ve správném pořadí volány uvnitř metody `paintEvent`, která se stará o celkové vykreslení displeje. Třída dále obsahuje mechanismy pro komunikaci s MFD. Jedná se o signály, které jsou posílány při stisku tlačítek na displeji a sloty, do kterých jsou posílány informace o změně hodnot navigačních dat. Zbývající metody slouží k obsluze kurzoru a kláves a k výpočtu letových veličin, které simulátor nedodává.

Pro výpočet trendů rychlosti a směru slouží třída `TrendCalc`, jejíž objekt je instancován uvnitř PFD. Do ní jsou periodicky vkládány aktuální hodnoty rychlosti a směru včetně času. Výstupem jsou pak průměrné hodnoty zrychlení a úhlové rychlosti, k jejichž získání je použito rovnic 5.

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} ; \omega = \frac{\Delta \theta}{\Delta t} \quad (5)$$

Obrázek 6.4 znázorňuje diagram těchto dvou tříd, pro zřehlednění jsou uvedeny jen veřejné metody.



Obr. 6.4: Diagram tříd primárního displeje

6.5 Implementace MFD

Třída MFD slouží k rozmístění a propojení komponent multifunkčního displeje a sama neslouží k vykreslování. Dále implementuje sloty, které slouží jako reakce na události stisknutí tlačítek na PFD nebo navigačním panelu. Samotné komponenty displeje jsou objekty následujících tříd:

EnginePanel

Třída pro vizualizaci motorových veličin. Jsou použity stejné principy jako u třídy PFD – metoda `paintEvent`, která následně volá privátní metody pro vykreslení jednotlivých grafických ukazatelů hodnot.

NavPanel

Třída pro vizualizaci navigačních údajů. Princip vykreslování je totožný s třídou `EnginePanel`, navíc implementuje komunikační rozhraní v podobě signálů a slotů, které je pak spojeno s mapou a zabezpečuje funkčnost tlačítek a předávání navigačních dat z mapy do navigačního panelu.

MapScene

Třída reprezentuje datový model mapy a letového plánu. Umožňuje vkládání grafických objektů na zadané souřadnice a následně jejich vykreslování pomocí třídy `MapView`. Základní vkládané objekty jsou třídy `Waypoint`, obsahující kromě souřadnic a jména údaje o rychlosti a výšce, které pak dále využívá `flight director`. Z `Waypoint` dědí třída `Airport`, která k výše uvedenému ještě přidává informace o letišti, směr drah a komunikační frekvence. Na scénu je dále vkládán obrázek mapy, značka aktuální polohy letounu a úsečky tvořící letový plán. Kromě těchto funkcí třída zajišťuje také výpočet vzdálenosti a kurzu k bodu letového plánu, odchylku od letové trasy a dobu letu k zadanému bodu. Tyto údaje pak předává na PFD a navigační panel.

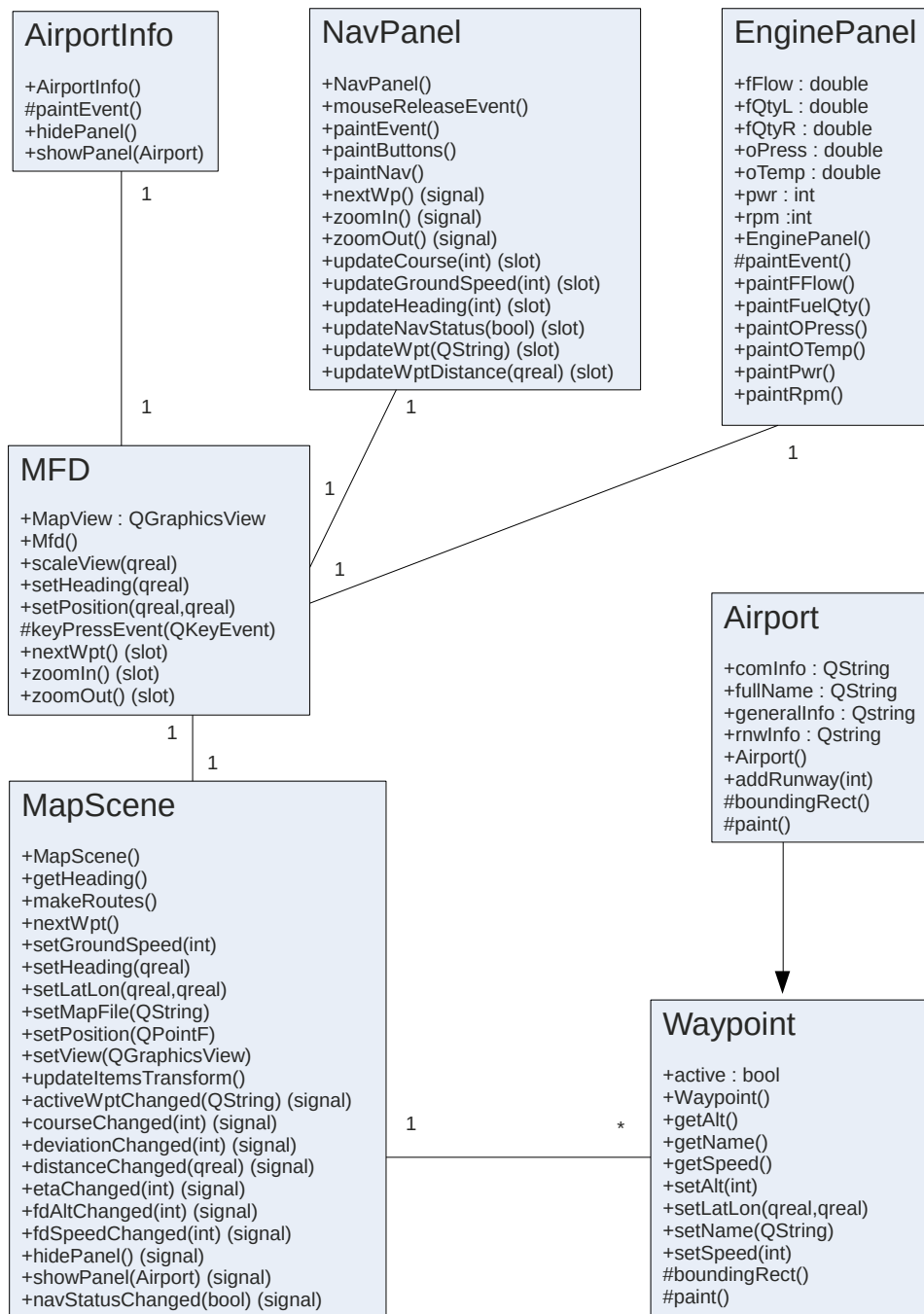
MapView

Třída zobrazující mapu. Vykresluje objekty obsažené v `MapScene` včetně požadovaných transformací posunu a rotace, vycházejících z aktuálních letových dat.

AirportInfo

Třída pro zobrazení informačního panelu s detaily letiště. Pro aktivaci je požadován objekt třídy `Airport`. Následně dojde k vykreslení mapy letiště, základních údajů, komunikačních frekvencí a VPD letiště.

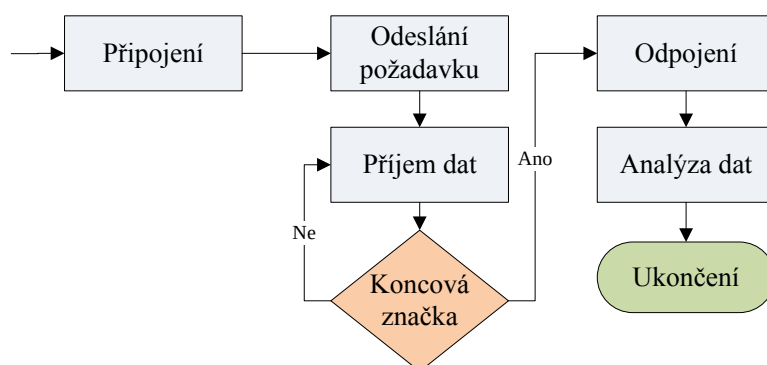
Obrázek 6.5 znázorňuje diagram tříd multifunkčního displeje a vztahy mezi nimi. Pro přehlednost nejsou uvedeny privátní proměnné a metody tříd.



Obr. 6.5: Diagram tříd multifunkčního displeje

6.6 Implementace COM

Třída COM slouží pro síťovou komunikaci s AW-COM serverem. Její hlavní úkol spočívá ve vyslání požadavku na aktuální letová data, jejich příjem, analýza a předání dat ve správných jednotkách dalším komponentám. K síťové komunikaci je použit neblokující TCP socket poskytnutý Qt frameworkem. Neblokující činnosti socketu je dosaženo mechanismem signálů a slotů. Na počátku činnosti je vyslán požadavek na připojení, nečeká se ovšem na jeho dokončení, ale řízení je předáno zpět událostní smyčce. Po úspěšném připojení je vyslán signál, který je obsloužen příslušným slotem, který se socketem pak dále pracuje. Stejná situace se pak opakuje při příjmu dat. Čekání na data neblokuje provádění kódu, příslušný slot pro zpracování dat je zavolán, až když jsou data na socketu opravdu dostupná. Přečtená data se průběžně ukládají do bufferu, dokud není přečtena koncová značka protokolu. Celý postup spojení je zobrazen na následujícím diagramu.



Obr. 6.6: Algoritmus komunikace

Po dokončení spojení a předání dat dochází k volání metod pro překreslení displejů. Je zbytečné volat překreslování častěji, protože stejně nedošlo k aktualizaci dat a výsledek překreslení by se nelišil od předchozího snímku. Interval opakování spojení byl po testování zvolen 40ms. Tato hodnota se jeví jako optimální z hlediska dostatečné plynulosti překreslování při současně nízkém vytížení CPU a síťového spojení. Tuto hodnotu lze změnit v konfiguračním souboru.

7 Testování

Testování je možno rozdělit na experimenty se softwarovým simulátorem X-Plane v domácích podmínkách a na testování přímo v laboratoři Aeroworks SimStar.

Průběžné testování bylo prováděno již od začátku vývoje v domácích podmínkách na dvou počítačích, z nichž jeden zajišťoval chod simulačního programu X-Plane 9 a komunikačního serveru AW-COM a druhý stroj pak sloužil k vizualizaci displejů. Toto zapojení se blíží architektuře simulátoru SimStar, takže bylo možné ověřit zejména chování síťového přenosu a připravit se na podmínky testování na simulátoru. V této fázi byla také ověřena zejména správnost zobrazovaných letových dat a očekávané chování displejů v různých nestandardních situacích. Dále byl ověřen správný přenos navigačních informací mezi MFD a PFD, včetně provedení navigačních letů podle letového plánu a to i mimo podmínek VFR, které byly úspěšné.

V druhé fázi byl program nasazen na simulátor SimStar, který umožňuje testování přímo v kokpitu. V místnosti operátora je pak zobrazen obraz jak z displejů, tak i ze simulátoru a je možné dle potřeby upravovat zdrojové kódy a ladit program na místě. Zde byly displeje ověřeny především z ergonomického hlediska, tedy jak jsou dostupné dotykové ovládací prvky displeje a jaká je viditelnost údajů na displejích přímo v kokpitu. Dále byly provedeny lety za zhoršených podmínek viditelnosti, během kterých pilot udržoval správnou orientaci a polohu stroje s pomocí displejů.



Obr. 7.1: Místnost operátora



Obr. 7.2: Simulátor SimStar

8 Závěr

V rámci této práce byl shrnut vývoj zobrazování letových veličin v pilotní kabině od počátku letectví až k současným technologiím a bylo rozebráno zobrazení jednotlivých letových údajů. Na základě těchto poznatků pak byl navrhnut způsob vizualizace ve formě dvou displejů s dotykovým ovládáním pro malý sportovní letoun. Důraz byl kladen na vzájemné propojení obou displejů na úrovni navigačních dat, na podporu informovanosti pilota o energetických stavech letounu a také na jeho upozornění v případě nestandardních situací. Cílem pak bylo zjednodušení navigačních úkonů a zvýšení bezpečnosti letu. Návrh byl následně implementován v prostředí leteckého simulátoru SimStar, kde došlo k ověření funkčnosti a předpokládaných vlastností.

Výsledky práce rozšiřují možnosti dalšího vývoje primárního displeje především v oblasti 3D zobrazení syntetického terénu a ve vizualizaci letové trasy. Neméně zajímavá je možnost kombinovat vizualizaci terénu s obrazem infračervené kamery. Tyto vylepšení vedou především k usnadnění pilotáže za podmínek snížené nebo minimální dohlednosti. Multifunkční displej lze dále rozšířit zejména o další vrstvy mapy, zobrazující například meteorologickou situaci či okolní letecký provoz. Z toho také následně plyne automatické plánování trasy letu a dynamická aktualizace letového plánu v závislosti na okolních podmínkách. Vývoj je možný i v oblasti síťového modulu, kde by šlo o implementaci reálně používaných leteckých protokolů a sběrnic.

9 Literatura

- [1] SOEKKHA, Hans M. *Aviation safety: human factors, system engineering, flight operations, economics, strategies, management*. Utrecht: VSP, 1997, xiv, 800 p. ISBN 90-676-4258-4.
- [2] SCHULTZ, Timothy Paul. *Redefining Flight: How the Predecessors of the Modern United States Air Force Transformed the Relationship Between Airmen and Aircraft*. ProQuest, Duke University, 2007. ISBN 9780549109518. Dissertation. Duke University.
- [3] Military Factory. *Aircraft Cockpits* [online]. 2013 [cit. 2013-01-10]. Dostupné z: <http://www.militaryfactory.com/cockpits/index.asp>
- [4] SOUČEK, Tomáš. *Jednotné evropské nebe. Letectví a kosmonautika*. Praha: Magnet-Press, 2011, roč. 2011, č. 12, s. 4. ISSN 0024-1156.
- [5] KELLER, Ladislav. *Učebnice pilota 2011*. 1. vyd. Cheb: Svět křídel, 2011, 716 s. ISBN 978-80-86808-90-1.
- [6] FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. *Instrument Flying Handbook: FAA-H-8083-15B*. Newcastle: Aviation Supplies & Academics, 2013. FAA Handbooks. ISBN 978-1619540224. Dostupné z: http://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aviation/media/FAA-H-8083-15B.pdf
- [7] Flight instruments. *Wikipedia* [online]. 2013 [cit. 2013-05-09]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Flight_instruments
- [8] Vírový prstenec na rotoru. *Vrtulník.cz* [online]. 2008 [cit. 2013-03-31]. Dostupné z: <http://www.vrtulnik.cz/teorie/pilotaz-z.htm>
- [9] Garmin 1000. GARMIN. *Garmin.com* [online]. 2013 [cit. 2013-05-09]. Dostupné z: www.garmin.com/products/g1000/
- [10] Avidyne Entegra. AVIDYNE. *Avidyne.com* [online]. 2013 [cit. 2013-05-09]. Dostupné z: <http://www.avidyne.com/products/entegra/index.asp>
- [11] BÍLEK, Jan. *AEROSPACE - Futuristický kokpit moderního letounu*. Brno, 2010. Diplomová práce. VUT Brno.
- [12] AMELINK, Matthijs H.J. *Visual Control Augmentation by presenting Energy Management Information in the Primary Flight Display*. Delft, 2002. MSc Thesis. Delft University of Technology.
- [13] LAMBREGTS, T., R. RADEMAKER a E. THEUNISSEN. *A new ecological primary flight display concept*. In: Digital Avionics Systems Conference, 2008. DASC 2008. IEEE/AIAA 27th. 2008, 4.A.1-1 - 4.A.1-20. DOI: 10.1109.
- [14] SportStar MAX. *Evektor.cz* [online]. © 2011-2013 [cit. 2013-03-31]. Dostupné z: <http://www.evektoraircraft.com/en/aircraft/sportstar-max/overview>

[15] GENERAL AVIATION MANUFACTURERS ASSOCIATION. RECOMMENDED GUIDELINES FOR PART 23 COCKPIT / FLIGHT DECK DESIGN [online]. Washington: General Aviation Manufacturers Association, 2000 [cit. 2013-03-31]. Dostupné z: http://gama.aero/files/gama_publication_10_hf_september_2000_pdf_498cad6edd.pdf

[16] SimStar. Aeroworks [online]. [cit. 2013-03-31]. Dostupné z: <http://merlin.fit.vutbr.cz/AeroWorks/>

[17] CHUDÝ, Peter a Karol RYDLO. Intuitive flight display for light aircraft. *AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference*. 2011.

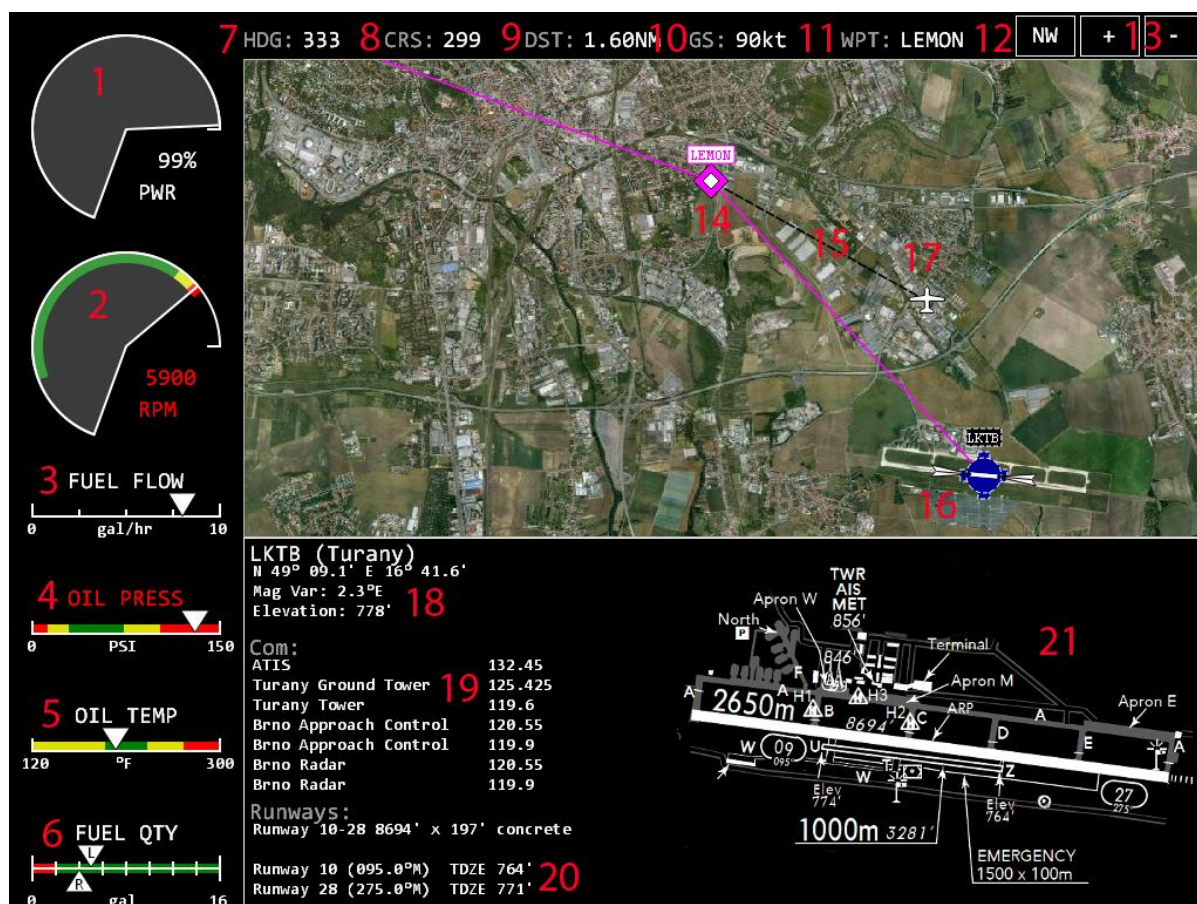
[18] RYDLO, Karol. *Vizualizace vzdušného prostoru ve 3D*. Brno, 2012. Diplomová Práce. Masarykova univerzita, Fakulta informatiky.

Příloha A – popis PFD



- | | | |
|---------------------------|----------------------------------|------------------------------|
| 1. Umělý horizont | 11. Referenční tlak výškoměru | 21. Kurz k bodu |
| 2. Rychloměr | 12. Variometr | 22. Odchylka od letové dráhy |
| 3. Trend změny rychlosti | 13. Výška terénu | 23. Zatačkoměr |
| 4. Zarážka rychlosti | 14. Optimální rychlost plachtění | 24. Upozornění |
| 5. Cílová rychlost | 15. Stupnice klonění | 25. Navigační informace |
| 6. Pravá vzdušná rychlost | 16. Stupnice klopení | 26. Teplota vzduchu a čas |
| 7. Výškoměr | 17. Relativní příčný sklonoměr | 27. Měřítko mapy |
| 8. Trend změny výšky | 18. PFPA | 28. Další letový bod |
| 9. Zarážka rychlosti | 19. FPA | 29. FPS |
| 10. Cílová výška | 20. Gyrokompas | |

Příloha B – popis MFD



- | | | |
|-----------------------------|--------------------------------|------------------|
| 1. Ukazatel výkonu | 11. Jméno bodu | 21. Mapa letiště |
| 2. Otáčkoměr | 12. Přejít na další bod | |
| 3. Ukazatel průtoku paliva | 13. Měřítka mapy | |
| 4. Ukazatel tlaku oleje | 14. Aktuální letový bod | |
| 5. Ukazatel teploty oleje | 15. Trasa ke zvolenému bodu | |
| 6. Ukazatel množství paliva | 16. Letiště | |
| 7. Směr letu | 17. Aktuální pozice letounu | |
| 8. Kurz k bodu | 18. Poloha letiště | |
| 9. Vzdálenost k bodu | 19. Rádioové frekvence letiště | |
| 10. Rychlost vůči zemi | 20. VPD letiště | |

Příloha C – Obsah CD a spuštění aplikace

Složka `bin` obsahuje spustitelný soubor programu zkompilovaný pro systémy Microsoft Windows včetně Qt knihoven nutných pro běh a obrazových podkladů pro mapu. Pro správné zobrazení na systému Windows XP je doporučeno nainstalovat přiložený font `Consolas`. Novější verze Windows mají již tento font obsažen. Pro konfiguraci programu slouží soubor `config.cfg` s následujícími volbami:

- `host` – adresa nebo jméno AW-COM serveru
- `port` – číselně zadaný port, na kterém naslouchá server
- `netEnabled` – povolení síťové komunikace ihned po startu programu, [true/false]
- `netRefresh` – interval v ms mezi zasláním požadavku na nová data

Vzorový příklad souboru `config.cfg`

```
host=localhost
port=12321

netEnabled=false
netRefresh=40
```

Povolení síťové komunikace je možno přímo v programu pomocí tlačítka `COM`.

Zobrazení přes celou obrazovku se zapíná klávesou `F` při focusu na vybraném displeji.

Pro testovací účely je možná změna pozice letounu na mapě. K tomu slouží klávesy `U`, `H`, `J`, `K` při focusu na kontrolním okně aplikace. Pro správnou funkci je potřeba vypnout síťovou komunikaci.

Složka `sources` obsahuje zdrojové soubory programu a soubor projektu pro nástroj Qt Creator.

Složka `text` obsahuje soubor textové části bakalářské práce ve formátu PDF.