



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY

ÚSTAV POČÍTAČOVÉ GRAFIKY A MULTIMÉDIÍ

DEPARTMENT OF COMPUTER GRAPHICS AND MULTIMEDIA

NÁVRH ZOBRAZENÍ PALUBNÍCH SYSTÉMŮ LETOUNU

AIRCRAFT SYSTEM DISPLAY DESIGN

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

JAKUB KOMÁREK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. PETER CHUDÝ, Ph.D. MBA

BRNO 2022

Zadání bakalářské práce



Student: **Komárek Jakub**
Program: Informační technologie
Název: **Návrh zobrazení palubních systémů letounu**
Aircraft system display design
Kategorie: Počítačová grafika

Zadání:

1. Diskutujte historický vývoj zobrazení systémových veličin v pilotní kabině.
2. Nastudujte současné trendy vizualizace systémových veličin letounu.
3. Navrhněte moderní vizualizaci systémových veličin letounu a příslušných ovládacích prvků.
4. Návrh implementujte v prostředí leteckého simulátoru.
5. Diskutujte možné směry a budoucí vývoj v rámci zkoumané disciplíny.

Literatura:

- Jukes, M.: Aircraft display systems. (Progress in Astronautics and Aeronautics), AIAA, 2004, ISBN 1563476576

Pro udělení zápočtu za první semestr je požadováno:

- Body 1, 2, 3 a část bodu 4.

Podrobné závazné pokyny pro vypracování práce viz <https://www.fit.vut.cz/study/theses/>

Vedoucí práce: **Chudý Peter, doc. Ing., Ph.D. MBA**

Vedoucí ústavu: Černocký Jan, doc. Dr. Ing.

Datum zadání: 1. listopadu 2021

Datum odevzdání: 11. května 2022

Datum schválení: 20. dubna 2022

Abstrakt

Práce se zabývá návrhem a implementací moderního avionického systému do kokpitu civilního letounu Boeing 737 MAXTM. Konkrétně se jedná o reimplementaci nadhlavového panelu do digitální podoby včetně ovládacích prvků, které jsou primárně ovládány dotykem. Implementace byla zhotovena jako prototyp napojený na simulátor X-Plane 11. Tento prototyp byl následně uživatelsky testován a poznatky z testování jsou shrnuty v závěru práce.

Abstract

This thesis is dealing with the design and implementation of the modern systems into the cockpit of a civilian aircraft Boeing 737 MAXTM. Specifically speaking, the implemented part of the cockpit is an overhead panel which has been redesigned to a digital form including the touch control components. The implementation was made as a prototype connected to the X-Plane 11 simulator. The prototype was then user tested and the findings from the testing are summarized at the end of the thesis.

Klíčová slova

Letecký kokpit, nadhlavový panel, dotykové ovládání, multifunkční displej, historie kokpitů, moderní kokpit, návrh uživatelského rozhraní, X-Plane 11, X-Plane Connect, MVC architektura, aplikační rámec Qt

Keywords

Aircraft cockpit, over-head panel, touch control, multifunctional display, history of cockpits, modern cockpit, user interface design, X-Plane 11, X-Plane Connect, MVC architecture, Qt framework

Citace

KOMÁREK, Jakub. *Návrh zobrazení palubních systémů letounu*. Brno, 2022. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce doc. Ing. Peter Chudý, Ph.D. MBA

Návrh zobrazení palubních systémů letounu

Prohlášení

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

.....
Jakub Komárek
9. května 2022

Poděkování

Děkuji panu doc. Ing. Peteru Chudému, Ph.D., MBA za poskytnutí velmi přínosných konzultací a poskytnutí důležitých poznatků vedoucí ke zhotovení této práce.

Obsah

1	Úvod	6
2	Historický vývoj zobrazení systémových veličin v kokpitu	7
2.1	Mechanická éra	7
2.2	Elektromechanická éra	9
2.3	Elektrooptická éra	10
3	Současná trendy vizualizace systémových veličin	12
3.1	Prvky moderního skleněného kokpitu	13
3.2	Moderní zobrazení systémových veličin a ovládacích prvků	16
4	Návrh moderní vizualizace systémových veličin	17
4.1	Volba platformy pro integraci systému	18
4.2	Návrhová etapa vývoje rozhraní	19
4.2.1	Zásady při návrhu a implementaci	19
4.2.2	Prostředky použité pro návrh uživatelského rozhraní	23
5	Implementace v prostředí leteckého simulátoru	25
5.1	Simulátor X-Plane 11	25
5.2	Struktura programu	26
5.3	Jednotlivé části rozhraní	30
5.3.1	Hlavní moduly letounu	30
5.3.2	Moduly operující se stlačeným vzduchem	34
5.3.3	Moduly manipulující s elektrickou energií	37
6	Uživatelské testování prototypu	40
6.1	Analýza výsledků testování	42
6.1.1	NASA-TLX	42
6.1.2	Hlavní testovací formulář	45
7	Možné budoucí směry a vývoj	49
8	Závěr	51
	Literatura	52
A	Dokumenty odkazované z textu	56
B	Paměťové médium	60

Seznam Zkratek

Zkratka	Význam	Překlad
APU	Auxiliary Power Unit	Pomocná energetická jednotka
CRT	Cathode Ray Tube	Katodová trubice
EFB	Electronic Flight Bag	Elektronická letecká taška
EGT	Exhaust Gas Temperature	Teplota výstupních plynů
FF	Fluid Flow	Průtok tekutin
FMS	Flight Management System	System řízení letu
GPS	Global Positioning System	Globální polohový systém
HUD	Head Up Display	Průhledový displej
LAN	Local Area Network	Lokální síť
LCD	Liquid Crystal Display	Displej tekutých krystalů
MFD	Multi-Functional Display	Multifunkční displej
MVC	Model View Controller	
NASA	National Aeronautics and Space Administration	Národní úřad pro letectví a vesmír
NASA-TLX	NASA-Task Load Index	
PFD	Primary Flight Display	Primární letový displej
QML	Qt Modeling Language	Qt modelovací jazyk
RGB	Red Green Blue	Červená, zelená a modrá
RTO	Rejected Takeoff	Zamítnutý vzlet
UDP	User Datagram Protocol	
UI	User Interface	Uživatelské rozhraní
UTC	Coordinated Universal Time	Koordinovaný světový čas

Slovník

Termín	Význam
Adobe XD	Vektorový program pro tvorbu návrhu uživatelských rozhraní.
Bleed air	Stlačený vzduch získaný z motoru proudového letounu.
CheckList	V letectví se jedná o seznam úkonů, které je nutné provést v jednotlivých fázích letu.
Float	Datový typ v počítači, který je určen pro ukládání reálných čísel.
Master caution	Centrální signalizace upozorňující na nestandardní činnost systémů letadla.
MVC	Softwarová architektura, která rozděluje model aplikace do tří komponent.
NASA-TLX	Formulář pro subjektivní posouzení pracovní zátěže.
Overhead panel	Panel nacházející se na stropě kokpitu sloužící k umístění ovládacích a zobrazovacích prvků. Český ekvivalent se nazývá nadhlavový panel.
Python	Vysokoúrovňový interpretovaný programovací jazyk.
QML	Deklarativní značkovací jazyk pro uživatelská rozhraní.
Qt	Multiplatformní aplikační rámec používaný pro vytváření aplikačního software.
Qt Quick	Standartní knihovna pro psaní QML aplikací. Poskytuje základní typy pro vytváření rozhraní.
Reference	V simulátoru X-Plane 11 se takto nazývají data, se kterými simulátor pracuje. Obvykle nabývají specifické float hodnoty či pole float hodnot.
RGB	Barevný model pro míchání barev ze tří základních složek.
UDP	Internetový protokol pro posílání dat skrze internet. Je označován jako nespolehlivý, protože doručení dat je bez záruky.
X-Plane 11	Letecký simulátor.
X-Plane Connect	Open source nástroj sloužící pro interakci s X-Plane simulátory.

Seznam obrázků

2.1	Letoun Wright Flyer.	7
2.2	Letoun Spirit of St. Louis	8
2.3	Letoun NY-2.	8
2.4	Kokpit letounu Sud Aviation Caravelle III. Převzato z [47].	9
2.5	Ukázka ovládacích panelů letounů v elektromechanické éře.	10
3.1	Moderní kokpit letounu Boeing 787 Dreamliner™. Převzato z [34].	12
3.2	Variace primárních letových displejů.	13
3.3	Ukázka systémů používaných v kokpitu moderního letounu.	15
3.4	Ukázka nadhlavového panelu v letounu Gulfstream G600™. Převzato z [42].	16
4.1	Letoun Boeing 737 MAX™.	17
4.2	Ukázka společných rysů na dvou modulech.	20
4.3	Ukázka zobrazení stavových hodnot na zhotovených komponentech.	21
4.4	Ukázky použitých ovládacích prvků v rozhraní.	22
4.5	Ukázka testu varování v hotovém rozhraní.	22
4.6	Zhotovené prototypy navrhovaného systému. Návrh se týká modulu pro správu paliva v letounu	24
5.1	Schéma MVC architektury v kontextu použití v aplikaci.	26
5.2	Ukázka referencí v prostředí nástroje DataRef Tool.	26
5.3	QtCreator s přídatným QML grafickým modulem pro snadný vývoj UI. . .	27
5.4	Schéma renderovací smyčky ukazující průběh vykreslovacího cyklu.	28
5.5	Zjednodušený model programu ukazující rozdělení programu na dva procesy.	29
5.6	Ukázka rozhraní s popisem uspořádání jednotlivých modulů v menu.	30
5.7	Modul na ovládání motorů letounu.	31
5.8	Modul ovládající hydraulické systémy letounu.	32
5.9	Modul pro kontrolu a správu palivového ústrojí letounu.	33
5.10	Modul ovládající distribuci stlačeného vzduchu.	34
5.11	Modul ovládající odmrazování letounu.	35
5.12	Modul ovládající teplotu v kabině letounu.	36
5.13	Modul obstarávající distribuci a správu elektrické energie letounu.	38
5.14	Modul ovládající externí osvětlení letounu.	39
5.15	Modul zobrazující indikátory otevřených dveří.	39
6.1	Testovací prostředí používané při testu UI.	40
6.2	Podrobnosti ohledně testovací skupiny.	41
6.3	Graf analyzované mentální náročnosti při testování rozhraní.	42
6.4	Graf analyzované fyzické náročnosti při testování rozhraní.	43

6.5	Graf analyzovaného stresu na subjekty při testování rozhraní.	43
6.6	Graf analyzované úspěšnosti při plnění úkolu v rámci testování rozhraní. . .	44
6.7	Graf míry vyvinuté snahy při plnění úkolu v rámci testování rozhraní. . . .	44
6.8	Graf míry frustrace při plnění úkolu v rámci testování rozhraní.	45
6.9	Grafy zaměřující se na analýzu funkčnosti rozhraní.	46
6.10	Grafy zaměřující se na analýzu estetické stránky rozhraní.	47
6.11	Grafy zaměřující se na porovnání analogového řešení s nově vytvořeným rozhraním.	48
7.1	Ukázka digitálního checklistu v GPS jednotce pro malé letouny. Převzato z [35].	49
7.2	Konceptuální kokpit s dotykovým displejem. Převzato z [43].	50
A.1	Současná podoba overhead panelu Boeingu 737 TM . Převzato z [31].	56
A.2	Upravený checklist letounu Boeing 737 (část 1/2). Převzato z [40].	57
A.3	Upravený checklist letounu Boeing 737 (část 2/2). Převzato z [40].	58
A.4	NASA TLX (Task Load Index) - formulář pro subjektivní posouzení pracovní zátěže. Převzato z [17].	59

Kapitola 1

Úvod

Tato práce se zabývá návrhem a implementací moderní vizualizace systémových veličin a ovládacích prvků kokpitu. Návrh vychází z analýzy historického vývoje daného oboru včetně analýzy nových trendů v letectví. Samotná implementace prototypu nadhlavového panelu byla provedena se zacílením na dopravní letoun Boeing 737 MAXTM v prostředí leteckého simulátoru X-Plane 11. Postupy zde zmíněné lze však aplikovat i na jiných modelech letounů.

Práce adresuje návrh řešení v kontextu vzrůstající poptávky po leteckých kokpitech zaměřených na provoz s pouze jedním pilotem, čemuž by usnadnění/automatizace dílčích systémů výrazně pomohla, díky menším nárokům kladených na pilota.

Práce se soustředí na digitalizaci části nadhlavového panelu. Jedná se o jednu z posledních manuálně ovládaných částí dnešních letounů a její digitalizace by mohla být prvním krokem k snadnějšímu napojení budoucích asistentů a palubní automatizace na daný systém. Kontrolu nad systémem by poté měla jak řídicí automatika, tak pilot.

Na úvod navazuje kapitola, která se soustředí na analýzu historického vývoje leteckých přístrojů. Ve třetí kapitole se práce soustředí na zmapování moderních trendů využívaných při návrhu kokpitů. Po uvedené rešerši se práce dále zaměřuje na návrh a realizaci nového rozhraní. Závěr práce je věnován uživatelskému testování, z kterého vyplynuly poznatky, na jejichž základě lze porovnat stávající variantu systému s nově zhotoveným řešením. Poslední kapitola je věnována možným směrům budoucího navázání na tuto práci.

Kapitola 2

Historický vývoj zobrazení systémových veličin v kokpitu

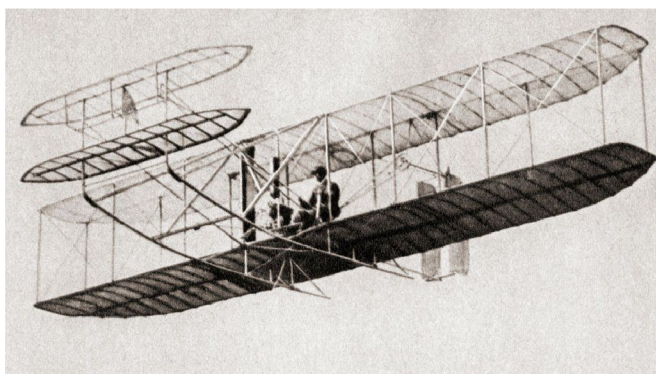
Tato kapitola stručně popisuje historický vývoj leteckých kokpitů v civilním prostředí. Předmětný vývoj je demonstrován praktickými ukázkami na vybraných letounech, které se chronologicky řadí do daného období. Samotný vývoj lze dělit do tří etap - mechanická, elektromechanická a elektrooptická.

Primárním literárním zdrojem této kapitoly je reference [7], která slouží jako vědomostní základ interpretovaných informací obohacených znalostmi z jiných zdrojů.

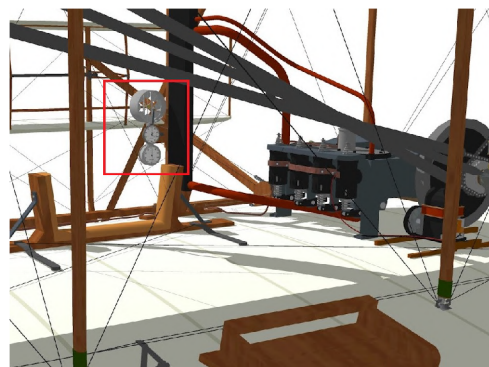
2.1 Mechanická éra

Začátek této éry se datuje do roku 1903 a je spojován se vzletem prvního motorového letounu. Tímto letounem byl dvouvrtulový dvojplášník bratrů Wrightů pojmenovaný Wright Flyer. Pokusnými lety bylo zjištěno, že pro snadnější provoz letounu je potřeba vizuálně indikovat letové informace.

Vznikly tedy první letecké přístroje, kterými byly nadcházející verze tohoto letounu postupně dovybaveny. Konkrétně šlo o anemometr (přístroj na měření rychlosti větru), vaničku s vodou pro měření úhlu náklonu, stopky na měření doby letu a otáčkoměr motoru [27]. Viz obrázek 2.1.



(a) Wright Flyer. Převzato z [32].



(b) Virtuálně rekonstruovaný kokpit letounu. Převzato z [49].

Obrázek 2.1: Letoun Wright Flyer.

Další pomyslný milník pokořil letoun Spirit of St. Louis, který na svou dobu obsahoval jedny z nejmodernějších leteckých přístrojů. Tento letoun byl navržen pro delší přelety. Pilot Charles Lindbergh s tímto strojem uskutečnil první transatlantický let čítající vzdálenost cca 5 800 km. Letoun poháněl velký 9 válcový hvězdicový motor. Kvůli velikosti tohoto motoru, nadměrné velikosti nádrže v místě těžiště a nutnosti aerodynamického tvaru letounu, byl výhled dopředu značně omezen. I tento fakt přispěl ke zvýšené potřebě poskytnout pilotovi lepší zpětnou vazbu ohledně stavu letounu [22].

Proto byl v prostoru palubní desky letounu instalován zatačkoměr, který indikoval rychlost otáčení okolo svislé osy a pár sklonoměrů indikující náklon letounu. Orientaci zajišťoval kompas. Dále letoun obsahoval výškoměr a přístroj na měření indikované vzdušné rychlosti. V neposlední řadě zde byla již poněkud obsáhlejší sada přístrojů na monitorování stavu motoru. Ta zahrnovala tlakoměry oleje a paliva, teploměr oleje a otáčkoměr motoru [7]. Viz obrázek 2.2.



(a) Spirit of St. Louis. Převzato z [38]. (b) Kokpit letounu. Převzato z [22].

Obrázek 2.2: Letoun Spirit of St. Louis

Velký pokrok v letectví byl zrealizován uvedením cvičného jednomotorového dvojplátníku NY-2. Prvenství si NY-2 vysloužil díky experimentům, ve kterých se piloti snažili létat pouze podle přístrojů. Účelem experimentů bylo provozování letounu za snížené viditelnosti (v mlze, v noci atd.) K tomuto účelu byl letoun vybaven již výše zmíněnou množinou přístrojů (rychloměr, kompas a zatačkoměr) doplněnou umělým horizontem, radionavigačním přístrojem, indikátorem vertikální rychlosti a speciálním Kolmanovým výškoměrem.

Tato množina přístrojů byla pro lety podle přístrojů klíčová a po zhruba 100 zkušebních letech se roku 1929 poručíku Jimmymu Doolittlovi povedlo odřídit celý let se zacloněnou kabinou pouze podle přístrojů [7, 14]. Viz obrázek 2.3.



(a) NY-2. Převzato z [36].

(b) Kokpit letounu NY-2. Převzato z [48].

(c) Konfigurace NY-2 pro let podle přístrojů. Převzato z [48].

Obrázek 2.3: Letoun NY-2.

2.2 Elektromechanická éra

Toto období začalo ve 30. letech 20. století a vyznačuje se vznikem pokročilých leteckých přístrojů, které byly již závislé na elektrickém napájení. Tyto přístroje měly obvykle standardizované rozměry a byly navrhovány modulárním způsobem pro snazší záměnu. Z podstaty této vlastnosti vyplývá, že každý takovýto přístroj měl obvykle jednu specifickou funkci, a proto jich muselo být v kokpitu vícero. S větším počtem těchto přístrojů již musely být zavedeny standardy popisující základní implementační principy, například jakým směrem by měly hodnoty v leteckých přístrojích klesat či stoupat, jakých rozměrů by měly přístroje nabývat a jaké barvy by v nich měly být použity.

Důležitým konceptem používaným do dnešních dní bylo standardizování základního rozpoložení nejdůležitějších přístrojů klíčových pro řízení letounu. Nejvíce používané rozložení bylo "basic 6", ze kterého se později odvodilo zjednodušené rozpoložení "basic T" (ukázka rozpoložení je naznačeno na obrázku 2.4). Tímto krokem se výrazně zjednodušil přechod pilotů z jiných typů letounů [7].



Obrázek 2.4: Kokpit letounu Sud Aviation Caravelle III. Převzato z [47].

Systémové veličiny a ovládací prvky v elektromechanické éře

Jak již bylo zmíněno, systémové veličiny byly zobrazeny na přístrojích v kokpitu. Důležité analogové přístroje, jako byly například otáčky motoru, se umísťovaly do pilotova zorného pole tzn. na palubní desku. Sekundární indikátory se nacházely na dalších přídavných panelech jako například nadhlavový panel. Příklad nadhlavového panelu je na obrázku 2.5a. Ovládací prvky systémů měly obvykle podobu přepínačů. Dvoustavové a třístavové přepínače měly páčkovou podobu. Pro více jak třístavové přepínače byla volena otočná podoba přepínače.

Na kritické ovládací prvky bylo nutné aplikovat mechanickou ochranu proti nechtěnému přepnutí. Základní ochrana spočívala v přidání ochranných lišt do okolí spínače, což vedlo ke snížení rizika zavadení o přepínač. O něco bezpečnější varianta spočívala v zakrytí přepínače krytkou, která musela být při manipulaci s přepínačem otevřena. Tyto krytky byly často

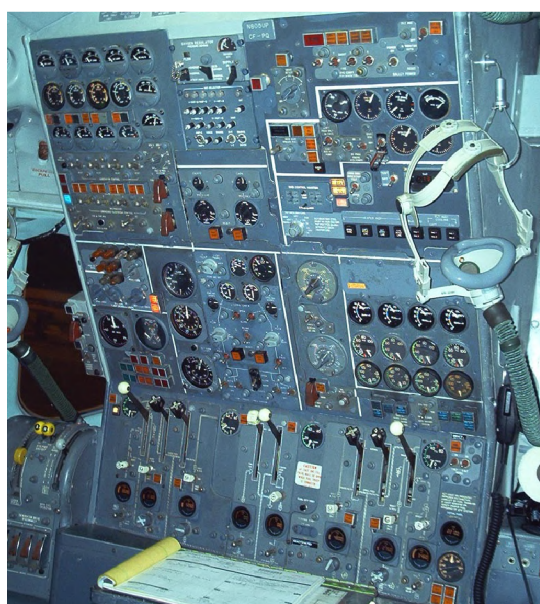
vylepšeny o možnost držení přepínače v určité pozici, kde po zavření krytky musel být přepínač například v zapnuté poloze. U vícepolohových přepínačů bylo větší bezpečnosti dosaženo za pomoci nutnosti přepínač povytáhnout před změnou stavu.

Ovládací a zobrazovací prvky se obvykle shlukovaly do logicky oddělených sekcí. To zajišťovalo snadnější orientaci na panelu. Často se tak dalo narazit na pomyslné vyznačení těchto sekcí čarami.

S rostoucí komplexností letounu vzrůstal počet systémů na palubě. Tyto systémy musely být obsluhovány ručně z důvodu malé míry automatizace, což kladlo velkou zátěž na piloty. Proto se v letounech objevovaly další členové posádky, kteří měli uvedenou zátěž snížit. Nejčastěji se jednalo o funkci palubního inženýra, který měl obvykle na starost ovládání motorů, palivových pump a hydraulických systémů [7, 45]. Obrázek 2.5b představuje panel palubního inženýra.



(a) Nadhlavový panel letounu Aviation Caravelle. Převzato z [33].



(b) Panel na pracovišti palubního inženýra. Převzato z [45].

Obrázek 2.5: Ukázka ovládacích panelů letounů v elektromechanické éře.

2.3 Elektrooptická éra

Se stoupající hustotou vzdušného provozu byl kladen větší důraz na navigační přístroje. Elektromechanické přístroje byly limitovány prostředky pro vizualizaci relevantních dat. Tento problém řešil nástup monitorů, které byly již používány ve vojenských letounech.

Celkově se tak tato éra soustředila na vhodnou interpretaci dat na obrazovkách, kterými postupně vytěsnila klasické analogové přístroje z paluby letounu. S novou technologií již bylo možné postupně usnadňovat či zcela automatizovat rutinní úkony pilotů, což mělo za následek snížení velikosti posádky. Postupem času se tak utvářel kokpit, tak jak ho známe dnes [7].

Katodová trubice

Princip technologie katodové trubice (CRT) spočívá ve vysílání paprsků z elektronových děl, které byly obvykle tři - pro každou základní barevnou složku jedno. Využívaly se však i monitory jednobarevné. Tyto paprsky se směřovaly pomocí elektromagnetického pole vytvářeného vychylovací cívkou. Paprsky pak dopadaly na stínítko potažené fosforem, kde vytvářely výsledný obraz [26].

Ačkoliv měla tato technologie proti klasickým elektromechanickým přístrojům mnoho výhod, měla pár zásadních omezení - displeje byly velké (do hloubky) a těžké, a pro požadovanou svítivost spotřebovávaly velké množství energie. Výroba takového monitoru s dostatečnou svítivostí a dobrou robustností pro letecké podmínky byla nákladná. Proto s nástupem LCD technologie byly tyto obrazovky poměrně rychle obměněny [7].

Displej tekutých krystalů

Zobrazovací element displeje z tekutých krystalů (LCD) je pixel. Pixel vytváří výslednou barvu kombinací svých 3 subpixelů - RGB. Intenzitu světlosti každého jednoho subpixelu redukuje tekuté krystaly, které jsou vloženy mezi průhledné elektrody a polarizační filtry. Elektrickým nábojem je řízeno natočení těchto krystalů a díky tomu dochází k řízení průchodu a polarizaci světla, které je generováno podsvícením za displejem. Kvůli zjednodušení zařízení jsou pixely seskupovány do řádků a sloupců. Pixely jsou postupně nastavovány obvykle po jednom.

Ačkoliv tato technologie má naprostou majoritní výhodu ve spotřebě, velikosti, váze a robustnosti, má oproti CRT technologii i pár negativních aspektů, které je nutné při použití v letectví brát v potaz. Jedná se například o pozorovací úhly (pilot musí dobře vidět data na displeji jeho kolegy). Dále pak displej musí zobrazit barvy tak, aby byly jednoznačně rozlišitelné a to i v celém rozsahu požadovaného pozorovacího úhlu (viz předchozí aspekt). V neposlední řadě je nutné, aby displej byl dobře čitelný i při působení denního světla.

Takovýto typ displeje pak musí být navržen tak, aby splňoval obecné normy pro použití v letounu, jako jsou vysoké teplotní rozsahy, změny atmosferického tlaku a jiné konstrukční aspekty [20].

Systémové veličiny a ovládací prvky

Na počátku této éry podstoupilo digitalizaci pouze omezené množství systémových veličin. To bylo způsobeno vysokou cenou za tuto technologii. Proto byly v kokpitech nejčastěji zdigitalizovány nejdůležitější systémy na hlavním panelu jako třeba systém na monitoring motorů. S rozšířením této technologie začaly být displeje levnější a lépe integrovatelné. Displeje se začaly více používat a v dnešních moderních kokpitech jsou často všechny veličiny plně digitální.

Co se týče samotného ztvárnění veličin, na displejích jsou reprezentovány s velkou mírou inspirace u jejich mechanické předloze. Takto zobrazené veličiny nejčastěji nabývaly budíkových tvarů. Dá se ale také setkat s reprezentací v podobě vertikálního sloupce, která byla využívána v případě potřeby zobrazení více veličin na displeji [7].

Kapitola 3

Současná trendy vizualizace systémových veličin

Tato kapitola je věnována popisu aktuálních trendů na poli civilní avioniky. Z poznatků uvedených v této kapitole vychází návrhová část práce, kde je využita podmnožina identifikovaných trendů.

Současná podoba moderního kokpitu je zobrazena na demonstračním obrázku 3.1, který zobrazuje kokpit letounu Boeing 787 Dreamliner™. Můžete si zde všimnout, že naprostá většina přístrojů je implementovaná na LCD displejích, což reflektuje trend tzv. glass kokpitů. Rozložení jednotlivých obrazovek je poměrně standardní a obvykle se dodržuje napříč výrobci.

Označené komponenty kokpitu na obrázku 3.1 budou podrobněji popsány v následujících podkapitolách. Legenda k obrázku je následující: (a) Nadhlavový panel (b) Průhledový displej (c) Primární letový displej (d) Multifunkční displej (e) Electronic flight bag (f) Systém ovládání letu.



Obrázek 3.1: Moderní kokpit letounu Boeing 787 Dreamliner™. Převzato z [34].

3.1 Prvky moderního skleněného kokpitu

Skleněné kokpity vhodně zobrazují letecká data v digitální formě na obrazovkách. Moderní skleněné kokpity obvykle disponují alespoň dvojicí displejů - multifunkčním a primárním letovým displejem. Do letounu se obvykle instalují ve dvou párech - pro kapitána a prvního důstojníka (duplikace zajišťuje redundanci pro případ výpadku části systému). I když jsou na displejích zobrazena všechna potřebná data, je tato konfigurace často vybavena záložní jednotkou obsahující základní přístroje (například kompas, zmenšený grafický umělý horizont) [16].

Tato konfigurace se často rozšiřuje o další pomocné displeje. Nejdůležitější data pro pilotáž jsou však již vyobrazena na výše zmíněné dvojici. Viz obrázek 3.1.

Primární letový displej

Primární letový displej (PFD) slouží k vyobrazení nejdůležitějších leteckých údajů. Jejich výhoda oproti klasickým elektromechanickým přístrojům spočívá hlavně ve větší přehlednosti a snadnější čitelnosti.

Aktuálně nejpoužívanější rozložení údajů vychází z historického rozložení elektromechanických přístrojů "basic 6"/"basic T". Na středu displeje je zobrazen umělý horizont, který je obklopen veličinami kriticky nutnými pro pilotáž - výškoměr s variometrem, rychloměr a indikátor kurzu. Jednotlivé veličiny jsou vyobrazeny páskovou reprezentací a reflektují tím historickou předlohu. Pásková reprezentace má výhodu ve snadném odhadu rychlosti změny jednotlivých veličin.

Toto rozložení se v posledních letech ustálilo a napříč leteckým průmyslem se obvykle dodržuje. Vzhledem k důležitosti údajů zobrazených tímto displejem se obvykle nekombinuje s jinými navigačními prostředími.

Čím dál větším trendem je do tohoto rozložení zanášet více informací. Příkladem je třeba zakomponování indikace mezních rychlostí pro určitou konfiguraci klapek, zakomponování indikace módů autopilota či vkládání varovných a informačních indikátorů [21]. PFD zobrazující dodatečná data o současném letu je zachyceno na obrázku 3.2a.



(a) PFD letounu Boeing. Snímek pořízen v simulátoru X-Plane 11.



(b) PFD se syntetickým viděním. Převzato z [8].

Obrázek 3.2: Variace primárních letových displejů.

Syntetické vidění často obohacuje PFD či HUD displej. Primární účel této technologie je vyobrazit pilotovi při méně příznivých viditelnostních podmínkách překážky v terénu a klíčové objekty, které by pilot za příznivých podmínek neměl problém vizuálně identifikovat. Celkově tak může tento systém dát pilotovi větší představu o okolním prostředí. Dalším využitím této technologie může být přesnější pilotáž díky virtuálním branám vyobrazeným v syntetickém vidění.

Tento systém nejčastěji funguje na základě počítačově vygenerovaného modelu okolního prostředí z dat, která jsou přítomná na palubě letounu. Tento model je následně vhodně zobrazen na obrazovce [8, 28]. Viz obrázek 3.2b.

Multifunkční displej

Multifunkční displej (MFD) se v letectví obvykle využívá pro zobrazení více informací rozložených do více virtuálních ploch. Většinou se do těchto displejů zakomponovávají například navigační přístroje, stavové hodnoty motorů, stav paliva, checklist, manuál, atd.

Ovládání displeje je řešeno postranními tlačítky. V novějších letounech je tento systém dovybaven dotykovým ovládáním. Alternativě lze displej ovládat pomocí speciálního trackballu nebo speciálního touchpadu.

Systém může zahrnovat i údaje zobrazované PFD a může tak sloužit jako záloha PFD. Při instalaci do malých a stísněných kokpitů se často instaluje pouze tento multifunkční displej (často však v kombinaci s HUD jednotkou - například ve stíhacích letounech) [25].

Systém řízení letu

Systém řízení letu (FMS) je důležitá komponenta letounu, jejímž účelem je usnadnit některé nutné úkony pilotů před a v průběhu letu. Pomocí přístupu k poloze letounu tak může systém kontrolovat současnou pozici vůči plánované trase. Pokročilejší systémy dokáží pomocí autopilota letoun automaticky řídit a to včetně zvolení optimální rychlosti pro ekonomický let. Systém dokáže přepínat frekvence radiostanic podle oblasti, kde se letoun nachází a propočítávat odhady množství paliva v jednotlivých fázích letu.

FMS obsahuje offline navigační databázi letišť, přistávacích drah, navigačních bodů a podobných významných dat pro orientaci v prostoru. Tato databáze se pro správnou funkčnost musí udržovat aktualizovaná (aktualizace každých 28 dní).

Uvedený systém se obvykle instaluje v párech jako samostatné nezávislé jednotky, které však za normálních okolností sdílejí stejná data, v případě poruchy mohou být provozovány samostatně. Starší verze měla pouze tlačítkové vstupy. FMS v moderních letounech však disponuje i dotykovou variantou a od předešlé verze se liší většími rozměry, což přispívá k lepší čitelnosti [25]. Viz obrázek 3.3a.

Electronic flight bag

Electronic Flight Bag (EFB) je zařízení, jehož záměrem bylo zredukovat či zcela nahradit většinu papírových dokumentů nutných pro provoz letounu. Hmotnost těchto dokumentů mnohdy přesahovala 18 kg a kvůli této váze a množství se s dokumenty hůře pracovalo.

EFB se může na palubě vyskytovat ve dvou formách - vestavěné a přenosné. Přenosnou formu může tvořit například obyčejný tablet s aplikačním zázemím, díky čemuž je pořizovací cena nízká. Tato výhoda je však vykoupena nedostatkem v podobě nemožnosti certifikovat zařízení na nejvyšší úroveň EFB. EFB tak může postrádat některé funkce, které by integrovaný EFB mohl obsahovat. Integrovaný displej navíc umožňuje užší spojení se systémem letounu, takže například zobrazuje přenos z kamer před vstupem do kabiny [19]. Viz obrázek 3.3b.

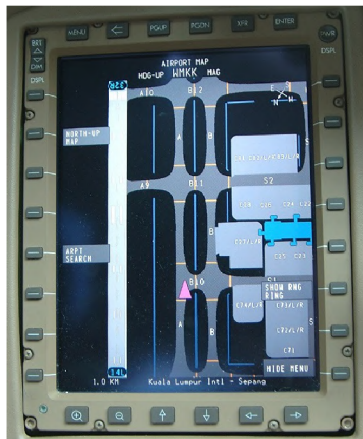
Průhledový displej

Průhledový displej (HUD) byl původně navržen a používán armádou v bojových letounech. V moderních komerčních letounech jsou HUD jednotky obvykle umístěny na sklopném rameni v zorném poli pilota. Jeho princip spočívá v projekci obrazu s informacemi na slučovač. Projekce je nejčastěji pouze monochromatická, obvykle v zelené barvě. Tímto způsobem jsou pilotovi sdělovány důležité údaje o stavu letounu, aniž by musel přerušit pohled ven z letounu. V civilních letounech jsou často do HUD promítány údaje podobné těm, jako jsou zobrazovány v PFD.

Pokročilejší HUD dokáží poskytnout noční vidění či rovnou disponují systémem syntetického vidění. Mohou tak zvýrazňovat přistávací dráhu, důležité body či odlehčenou mapu terénu [28]. Viz obrázek 3.3c.



(a) FMS jednotka.
Převzato z [39].



(b) EFB jednotka.
Převzato z [37].



(c) HUD displej. Převzato z [41].

Obrázek 3.3: Ukázka systémů používaných v kokpitu moderního letounu.

3.2 Moderní zobrazení systémových veličin a ovládacích prvků

V moderních letounech jsou nejdůležitější systémové veličiny často vyobrazeny na vyhrazených displejích. Veličiny a stavy, které nejsou kritické pro pilotáž, jsou nejčastěji vyobrazeny na multifunkčních displejích. V moderních systémech často není cílem zobrazit danou veličinu, nýbrž jde o uvedení těchto veličin do kontextu celého leteckého systému. Lze tak narazit na celou řadu schémat určených pro zařazení těchto veličin do kontextu používání.

Dotykové ovládání systémů letounu

Poměrně novým trendem v letectví spojeným s obrazovkami je integrace dotykového ovládání zakomponovaného do víceúčelových displejů. Hlavní výhodou ovládání systémů dotykově je velká úspora místa. Toho je dosaženo rozložením spínačů do více virtuálních ploch. Další výhodou je intuitivnější ovládání díky možnosti rozložit reprezentaci systému na podobiznu systému. Nehledě na výhody nabízené dotykovým ovládáním se k displejům často přidává i alternativní ovládání pro případ výpadku dotykové vrstvy.

Příkladem letounu, kde je tato technologie masově využívána, může být Business jet Gulfstream G600TM, který těží z dotykové technologie maximum. Letoun obsahuje 11 dotykových obrazovek, kterými nahradil většinu přepínačů potřebných pro provoz systému. Nadhlavový panel G600TM se skládá ze tří identických dotykových obrazovek. Na těchto panelech lze pomocí menu přepínat jednotlivé moduly obsluhující množinu kontrolních a zobrazovacích prvků [24]. Viz obrázek 3.4.



Obrázek 3.4: Ukázka nadhlavového panelu v letounu Gulfstream G600TM. Převzato z [42].

Kapitola 4

Návrh moderní vizualizace systémových veličin

V této kapitole je zdokumentována návrhová etapa vývoje rozhraní. Nejdříve jsou zmíněny aspekty, z kterých návrh vychází, poté jsou diskutovány zásady dodržované při vzniku rozhraní a na závěr jsou představeny metody využívané při prototypování.

Návrh moderního systému byl inspirován trendem glass kokpitů. Konkrétně se věnuje digitalizaci nadhlavového panelu, protože se jedná o jednu z posledních analogově ovládaných částí kokpitu. Dotykové ovládání bylo zvoleno jako primární forma obsluhy uvedeného systému. S jistotou se dá říci, že v produkční verzi se rozhraní musí dát ovládat i alternativně kvůli případnému selhání dotykové vrstvy.

Návrh vychází z předpokladu, že do letounu bude nainstalovaná dotyková LCD obrazovka, která bude zastupovat nadhlavový panel. Při implementaci autor uvažoval standardní obrazovku s rozlišením full HD a velikostí 15 palců - rozměrově podobné displeje jsou již ve zvoleném letounu instalovány. Obrazovka by měla ideálně vyplnit prostor mezi multifunkčními displeji a kvadrantem řízení motorů. Konkrétní umístění displeje musí být dobře dosažitelné ovládací rukou z pozice pilotů, a to i v případě pevně utažených pásů. Autorem prezentovaná pozice je spíše ilustrativní.



(a) Letoun při přistání. Převzato z [46].



(b) Kokpit letounu dovybavený HUD jednotkou na pozici kapitána. Převzato z [44].

Obrázek 4.1: Letoun Boeing 737 MAX™.

4.1 Volba platformy pro integraci systému

Cílovou platformou byl zvolen dvoumotorový proudový dopravní letoun Boeing 737 MAX™ (viz obrázek 4.1a). Uvedený letoun byl zvolen z důvodu současných požadavků letecké dopravy, která preferuje početnější flotilu menších letounů pro větší flexibilitu logistiky aerolinií.

Boeing 737 MAX™ je již 4. generací řady 737 a je považován za přímou odpověď na konkurenční produkt Airbus A320neo™. Oba zmíněné letouny využily zkušeností z provozu předchozí generace jejich řady a obměnily minimum prvků letounu.

Letouny Boeingu 737 prošly napříč jednotlivými generacemi intenzivní modernizací. Podstata vylepšení spočívala v digitalizaci starších analogových přístrojů a jejich nahrazení displeji (nejdříve CRT, posléze LCD). Dále byly volitelně přidány HUD jednotky. V ovládání jednotlivých systémů letounu byly provedeny drobné modernizace (například nahrazení pák volnoběhu motorů spínači, nahrazení voltmetrů a ampérmetrů segmentovými displeji atd.). Jinak jsou ovládací prvky ve všech generacích téměř totožné. V aktuální základní konfiguraci je letoun Boeing 737 MAX™ opatřen čtyřmi 15" LCD displeji. Dva PFD zobrazují umělý horizont a stavové veličiny. Dva MFD obsahují navigační údaje a podrobnosti o propulzním systému atd. Viz obrázek 4.1b.

Popis a zhodnocení současného řešení nadhlavového panelu

I když na první pohled vypadá nadhlavový panel komplexně, jsou spínače, přístroje a kontrolky seskupovány podle funkce do větších celků. Uvedené celky obvykle ovládají jeden systém letounu a jsou poskládány z panelových modulů, které se snadno vyměňují a udržují. Modulární přístup však zabraňuje hlubšímu propojení prvků systému, a proto si pilot musí tyto návaznosti domýšlet. Příkladem této vlastnosti může být část panelu ovládající distribuci napájení, která má stavové údaje o jednotlivých komponentech systému kompletně separované od ovládací části (tato část navíc znemožňuje snadné procházení údajů - zobrazené údaje se musí volit vícepolohovým přepínačem). Jednotlivé ovládací a zobrazovací prvky se návrháři snažili vyobrazit tak, aby vystihovaly alespoň základní podstatu systému (například palivový modul má mezi přepínači pump čáry symbolizující potrubí v letounu). Kvůli nedostatku místa jsou možnosti takového vyobrazení značně omezené.

Ačkoliv byl nepochybně kladen důraz na logické uspořádání prvků, nedalo se vyhnout občasnému neintuitivnímu rozmístění prvků systému. Příkladem může být hydraulický okruh, který je členěn do tří částí. Dva jsou vměstnány do nadhlavového panelu a jeden se nachází na multifunkčním displeji. Tato vlastnost současného řešení je nevyhnutelná a je způsobena omezeným místem jak na panelu, tak celkově v prostoru kokpitu letounu.

Systém indikace varování na současném panelu funguje na principu, že indikace poruchy rozsvítí varování na nadhlavovém panelu. Zároveň se rozsvítí tzv. master caution indikátor přítomný v pilotově zorném poli nad PFD. Vedle tohoto indikátoru je pak určeno, na kterém konkrétním systému předmětné chybové hlášení nastalo. Správný způsob diagnostiky varování by tedy měl vypadat následovně. Pilot zpozoruje master caution varování, vedle tohoto indikátoru zjistí, na kterém modulu nastala porucha a při pohledu na nadhlavový panel musí tuto poruchu identifikovat. Po vyřešení situace musí pilot rozsvícený indikátor master caution stlačit a tím indikátor uvést do původního stavu. Podle autorova názoru tento proces zahrnuje mnoho malých úkonů, které v konečném důsledku mohou celý proces řešení problému zdržovat. Obrázek nadhlavového panelu se z důvodu nadměrné velikosti nachází v příloze A.1.

4.2 Návrhová etapa vývoje rozhraní

Hlavním cílem při návrhu bylo zdokonalení interpretace informací kokpitu tak, aby byly informace lépe čitelné a jejich rozložení bylo pro uživatele intuitivní. Důraz byl kladen na uživatelsky komfortní zobrazení systémových informací. Řízení systémů letounu pomocí nového rozhraní by mělo být jednodušší a kritické prvky systému zabezpečené proti nechtěnému přepnutí. V konečném stavu by ovládání mělo být rychlejší a snadnější než je tomu u současného řešení.

Druhým zvoleným cílem, na který se práce zaměřila, je estetická realizace rozhraní. Podle autorova názoru je potřeba zajistit uživateli příjemné pracovní prostředí vzhledem k potencionální četnosti užívání rozhraní.

Vzhledem ke studijní povaze projektu však není počítáno s tím, že by se systém nasadil do pilotní kabiny. Pokud by tak mělo být učiněno, musel by systém splňovat platné letecké předpisy, normy a nařízení ohledně leteckých systémů. Následně by systém musel projít dlouhým procesem certifikace. Tento projekt by měl především sloužit k pozorování vlivů vytvořeného rozhraní na pilota.

Obecný popis návrhu

Při vytváření návrhu byl autorem kladen důraz na využití zažitých konvencí u leteckých systémů. Ve snaze vytvořit intuitivnější interpretaci dat a ovládacích prvků byla zvolena dnes populární cesta vkládání informací do abstraktní podoby popisovaného systému připomínající odlehčená systémová schémata.

Samotný systém byl rozdělen na moduly, kde každý modul má samostatnou virtuální plochu, která se zobrazí při prokliku přes odpovídající položku v menu. Výběr prvků obsažených v modulech byl proveden většinou na základě historické předlohy. Prvky byly přeuspořádány tak, aby moduly obsahovaly související prvky. Příležitostně docházelo k tomu, že kontrolky a přepínače přítomné například na středové konzoli byly zkombinovány s prvky na nadhlavovém panelu. Samotné menu, přes které se moduly přepínají, bylo vloženo na levou stranu navrhovaného rozhraní. Toto menu je statické a v rámci jakéhokoliv stavu rozhraní zůstává uspořádání neměnné.

4.2.1 Zásady při návrhu a implementaci

Pro zachování přehlednosti a jednotného vzhledu se autor při návrhu řídil následujícími pravidly, které vychází z obecně známých zásad při tvorbě uživatelských rozhraní.

Font písma

Font písma je v celém programu jednotný. Vzhledem k faktu, že se na popiscích v kokpitu často používají jenom velká písmena, bylo rozhodnuto tuto zásadu respektovat. Pro snadnou čitelnost jsou primárně používány dvě velikosti písma. Pro popisky, jednotky či jiné doplňkové informace byla zvolena výška písma 10px. Pro digitální hodnoty přístrojů, indikátory a jiné důležité prvky rozhraní byla zvolena velikost 20px. Velikost 40px byla vybrána pro kriticky důležité údaje jako je indikátor požáru, ten se v rozhraní vyskytuje pouze výjimečně. Dá se tedy říci, že za normálních okolností uživatel čte hlavně jednu velikost fontu, což by mělo přispět k menší únavě oka.

Rozložení

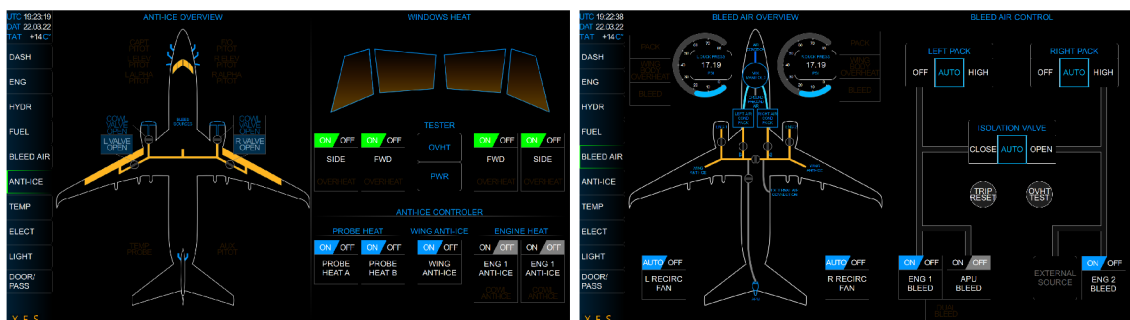
Rozložení bylo koncipováno dnes již poměrně standardním způsobem známým z webů případně jiných podobných aplikací. Na straně se pevně nachází menu a zbytek obrazovky tvoří užitečný obsah.

Pro rozložení užitečného obsahu jsou použity dva hlavní koncepty. První používaný koncept spočívá v horizontálním rozdělení obrazovky na dvě poloviny. Levá polovina slouží k zobrazení stavu jednotlivých modulů, pravá polovina k uložení ovládacích prvků daného modulu.

Druhým konceptem bylo zkombinování řídicích prvků se zobrazovacími prostředky. Výsledkem tohoto spojení bylo odlehčené schéma dostatečně zvětšené natolik, aby se ovládací prvky bez problémů do tohoto schématu vešly. U složitějších modulů se ale představený koncept ukázal být nepraktický, místy i nerealizovatelný. Z tohoto důvodu bylo diskutované rozložení použito zřídka. Tento koncept je ukázán na obrázku 4.6b.

Společné rysy a opakování

Pro snazší orientaci uživatele v rozhraní byl při návrhu ve velké míře využíván princip opakování. Dodržováním uvedeného principu se snižuje riziko nežádoucího překvapení uživatele při přechodu na jiný modul rozhraní. Hlavním prvkem, který se ve vytvořeném rozhraní opakuje, je zmenšený obrys půdorysu letounu. Základní půdorys je pak v kontextu daného modulu doplněn o grafické komponenty popisující primární funkčnost zobrazeného systému. Ukázka viz obrázek 4.2.



Obrázek 4.2: Ukázka společných rysů na dvou modulech.

Barevné schéma

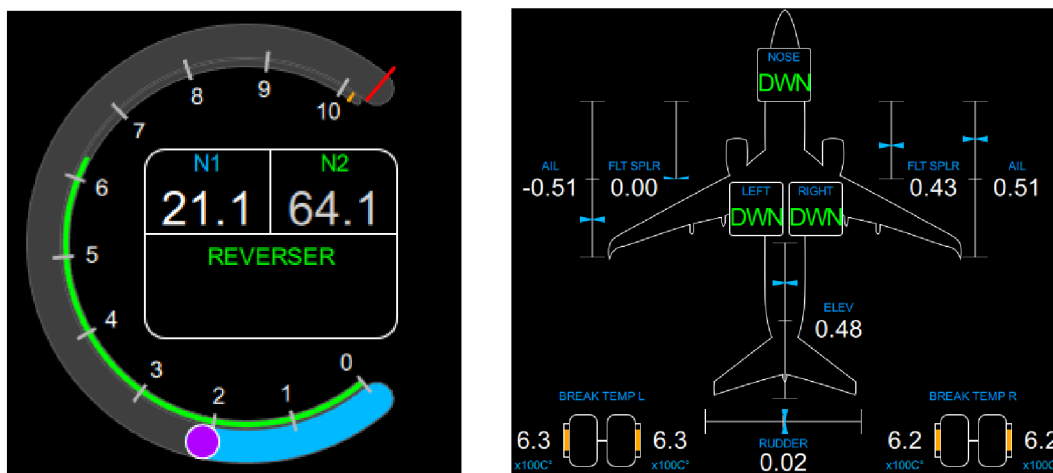
Pro snížení únavy oka bylo zvoleno tmavé téma rozhraní. Důležité údaje jsou vyobrazeny s co největším kontrastem vůči okolí (černé pozadí) pomocí bílé barvy. V rámci všech vytvořených modulů se autor snažil držet jednotného používání barev, které mají v avionice specifický význam tj. červená pro kritické stavy, oranžová pro indikování poruchy/chyby a abnormální stavy, zelená pro systémy, které fungují správně. Pro odlišení od dvou hlavních barev (černá a bílá) jsou použity dva odstíny modré - světle modrá pro vyobrazení stavu přístrojů, tmavě modrá pro popisky prvků. Tato barva je v avionice na displejích pro uvedený účel často používaná.

Pro sekundární prvky, jako je ohraničení položek, oddělení logických částí modulu a podobné jsou použity méně kontrastní barvy, většinou tmavší odstíny šedi. V návrhu rozhraní je často využito gradientních přechodů tak, aby moduly působily opticky odlehčeně.

Zobrazování veličin a stavových hodnot

Fundamentální částí rozhraní jsou přístroje na zobrazování systémových veličin, obvykle se jedná o analogové přístroje, či jiné ukazatele. Grafický vzhled přístrojů byl zhotoven následujícím způsobem - hodnota je zobrazována na analogové stupnici (přístroj, posuvník, horizontální ukazatel), čímž byly zachovány výhody analogového zobrazení a zároveň byla dodržena návaznost na historickou předlohu ukazatelů. Mezi výhody analogového zobrazení patří dobrá čitelnost v případě oscilující hodnoty, povědomí o rychlosti změny měřené veličiny a přehledné zobrazení kritických mezí daného přístroje.

Druhou částí indikátorů je digitální hodnota, která slouží pilotovi jako primární zdroj informací. Autor uvažoval, že kognitivní zpracování hodnoty v textové podobě je rychlejší, než proces zpracování hodnoty dle polohy ručičky budíku. Ukázky viz obrázek 4.3.



(a) Ukazatel otáček turbín motoru s indikováním nestandardních stavů.

(b) Ukazatel výchylek jednotlivých řídicích ploch, stavu podvozku a teploty brzd.

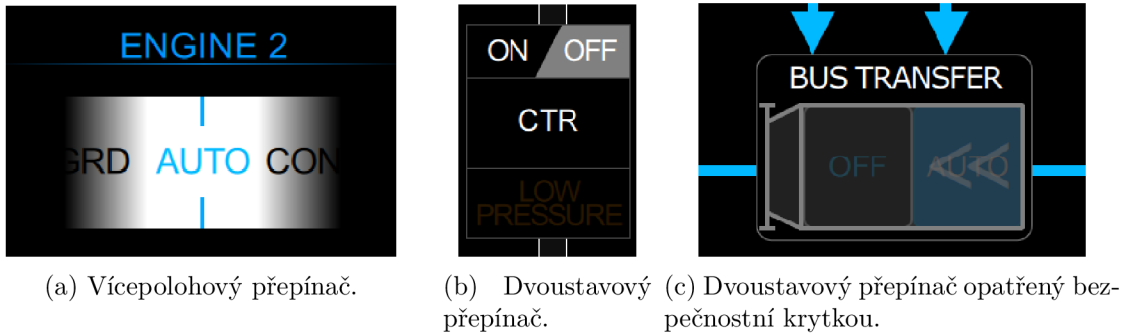
Obrázek 4.3: Ukázka zobrazení stavových hodnot na zhotovených komponentech.

Ovládací prvky

Ovládací prvky rozhraní byly vytvářeny dostatečně velké tak, aby následná manipulace s nimi byla snazší. U dvoustavových přepínačů toho bylo docíleno tak, že kontrolní plocha přepínače je společná pro oba stavy - klikáním na stejnou plochu přepínač mění stav (viz obrázek 4.4b). U více polohových přepínačů této vlastnosti však nešlo využít, a proto musel být každý stav přepínače oddělen. Důležité spínače byly opatřeny bezpečnostní krytkou, která znemožňuje nechtěné přepnutí (viz obrázek 4.4c).

Vícepolohový přepínač byl typicky používán pro více než čtyřstavové přepínače, které vzhledem připomínají výřez z válce, na kterém jsou otištěny názvy stavů. Tímto přístupem se radikálně zmenšily rozměry přepínače a zároveň uvedený krok vedl k jasné interpretaci aktuálního stavu. Odhalený nedostatek v podobně nejasného rozmístění jednotlivých stavů přepínače na "válcí" byl do jisté míry vyřešen zobrazením sousedních stavů. Tento nedostatek byl často nepodstatný z důvodu snadného odvození stavů, kdy stavy měly inkrementální/dekrementální povahu. U spínačů, které tento charakter neměly bylo spoléháno na historickou předlohu přepínače - pilot, který byl přeškolen z předchozí generace letounu by pravděpodobně podvědomě polohy přepínačů znal (viz obrázek 4.4a).

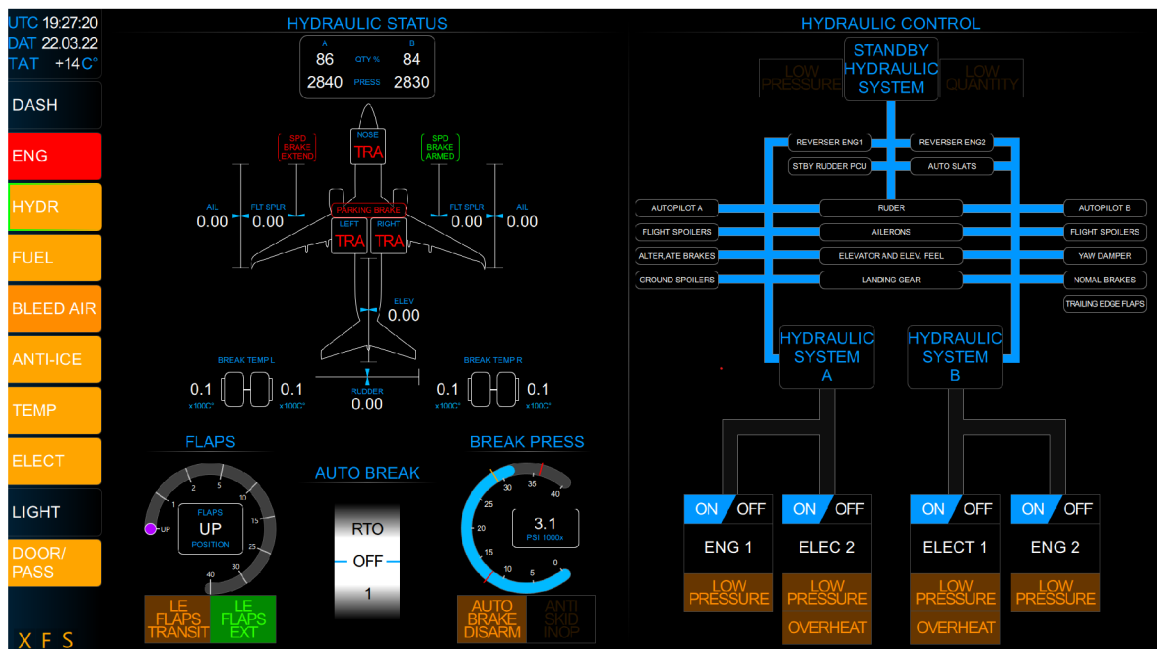
Způsob ovládání těchto prvků byl zvolen poměrně přímočaře, protože složitá gesta by mohla vést k nejasnému ovládání. Většiny ovládacích prvků lze ovládat pouhým klikáním jedním prstem. Ovládání jednoduchými gesty bylo také implementováno, jakožto alternativní forma ovládání převzatá z dotykových rozhraní podobného zaměření.



Obrázek 4.4: Ukázky použitých ovládacích prvků v rozhraní.

Indikace varování

Jednotlivé systémy příležitostně nabudou abnormálního stavu a tuto informaci je poté nutno předat pilotovi. Řešení je zpracováno tak, že pokud se v daném modulu nachází chyba nebo varování, daná položka v přepínacím menu je vybarvena příslušnou barvou. Tento princip může připomínat master caution systém zmíněný v předchozí sekci s tím rozdílem, že po indikaci varování ví pilot přesně, kde má tuto chybu hledat. Viz obrázek 4.5.



Obrázek 4.5: Ukázka testu varování v hotovém rozhraní.

4.2.2 Prostředky použité pro návrh uživatelského rozhraní

Po stanovení již popsáných zásad bylo možné v návrhu pokračovat dále. Nejdříve vzniklo několik drátových modelů a po výběru nejlepších kandidátů z nich byly vytvořeny grafické návrhy. Po tomto kroku byla zahájena činnost na implementační části práce popsané v následující kapitole.

Drátový model

Drátové modely obvykle slouží pro vyjasnění polohy jednotlivých prvků rozhraní a ne pro vyobrazení grafické reprezentace, jak by mohlo na první pohled budít dojem. Drátové modely mají různé úrovně propracovanosti tak, aby mohly splnit účel, pro který jsou vytvořené.

Základní modely se obvykle skládají z čar jedné barvy a text má pouze umělecký charakter. Tyto modely jsou vhodné pro vyjasnění rozmístění jednotlivých prvků a sjednocení přístupů jednotlivých vývojářů. Vzhledem k trivialitě těchto modelů se případné změny v nich dají provést velmi snadno.

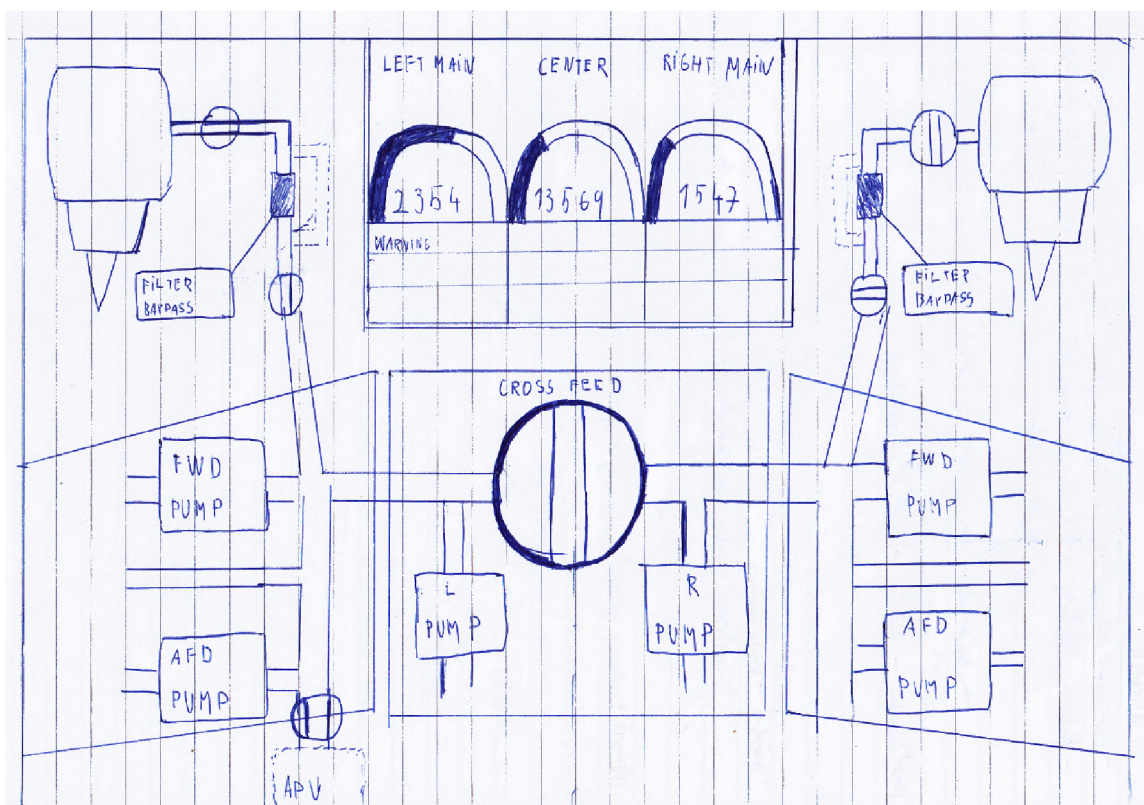
Propracovanější modely mohou mít stejný obsah, jako bude v konečné reprezentaci rozhraní. Tento obsah může mít i propracovanější rysy podobné jako u konečného produktu. Uvedené modely se často vytváří jako proklikávací (modely mají implementovanou základní funkčnost). Díky poslední zmíněné vlastnosti se s uživateli dá provádět testování už v návrhové části projektu a získat tím cennou zpětnou vazbu ještě před dokončením skutečného prototypu [6].

Vzhledem k povaze projektu byl zvolen model odlehčenějšího charakteru. Autor vytvořil několik základních konceptů, které poté porovnal a vybral nejlepší adepty pro další analýzu. Uvedené koncepty byly vytvořeny v papírové podobě viz obrázek 4.6a.

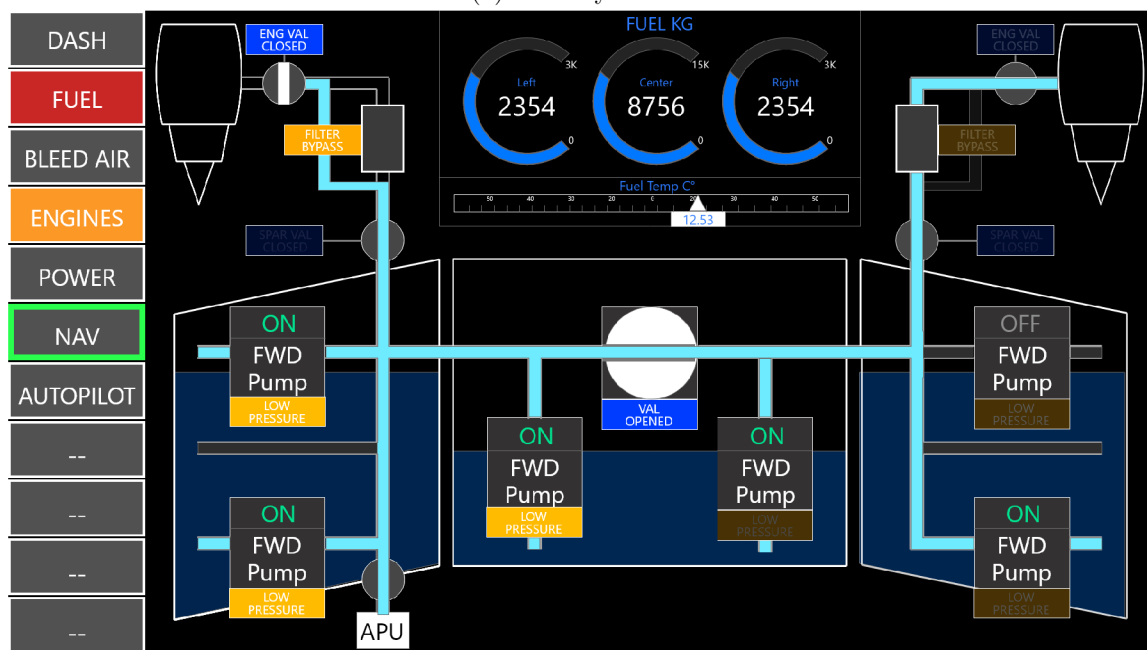
Grafický návrh

Grafický návrh se naopak od drátového modelu soustředí na vizuální stránku rozhraní. V této fázi návrhu je důležité vyjasnit fundamentální barevné kombinace a motivy v rozhraní.

Pro tento účel byl použit nástroj Adobe XD, který dokáže vytvořit atraktivní grafické návrhy rozhraní ve vektorové podobě. Jednou z ceněných vlastností programu je možnost tvorby jednotlivých komponent rozhraní a návrh stavů dané komponenty, čehož bylo při návrhu využito. Ukázka vytvořených grafických modelů je prezentována na obrázku 4.6b.



(a) Drátový model.



(b) Grafický model.

Obrázek 4.6: Zhotovené prototypy navrhovaného systému. Návrh se týká modulu pro správu paliva v letounu

Kapitola 5

Implementace v prostředí leteckého simulátoru

V této kapitole je popsán postup realizace představeného návrhu. V kapitole bude specifikována základní logika programu, návrhové vzory použité při vývoji a nástroje podílející se na realizaci programu. Dále budou probrány popisy a realizace jednotlivých modulů.

5.1 Simulátor X-Plane 11

Pro účely testování byl použit letecký simulátor X-Plane 11 od společnosti Laminar Research. Tento simulátor byl zvolen kvůli jeho dostupnosti (jedná se o jeden z nejrozšířenějších simulátorů pro osobní počítače) a poměrně věrné simulaci. Simulátor je dostupný pro operační systém Windows, MacOS a Linux. V současné době probíhají vývojové práce na nové majoritní verzi - X-Plane 12, která by měla přinést vylepšenou grafickou stránku simulátoru [29].

Ačkoli se v základní edici simulátoru nachází poměrně detailně zpracovaný letoun Boeing 737 NG, pro vývoj rozhraní byl použit komunitní projekt skupiny Max Team Design, který ztvárňuje modernější model Boeingu 737 MAX™ 10. Ten se od letounu ze základní edice liší detailnějším zpracováním. Oficiální stránka pro stažení použitého modelu letounu viz [13].

Propojení se simulátorem

Datové propojení se simulátorem lze realizovat pomocí zápisu stavových dat do souboru nebo odesíláním dat v reálném čase přes síť UDP protokolem. Zápis do souboru se hodí na zaznamenání činnosti simulátoru a případné ladění. Druhý přístup je vhodný spíše pro monitorovací činnost.

Pro účely vlastního kokpitu je vhodné využít síťovou komunikaci. Tímto způsobem lze připojit k simulátoru vícero ovládacích periférií podobného rázu. Výhodou tohoto přístupu je, že ovládací periferie může běžet nad různými operačními systémy a nad různým hardwarem. Jediné omezení pro periférii je přístup k internetové síti¹ [30].

¹Na stanici, kde simulátor běží, lze připojit program v rámci LAN).

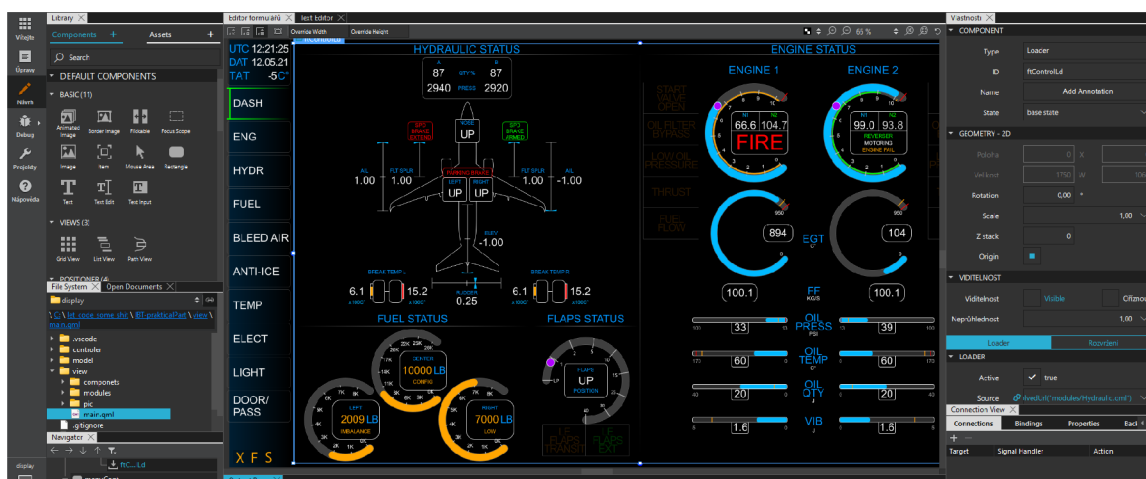
Modifikace dat oproti získávání je poněkud složitější proces - pokud je požadavkem referenci přímo modifikovat, musí být daná reference zapisovatelná (některé hodnoty jsou závislé na jiných stavech simulátoru, a proto do nich nelze zapisovat). Pokud reference tuto podmínku splňuje, lze referenci odeslat zpět do simulátoru pro zápis podobným způsobem jako u získání. Toto řešení má svá úskalí. V případě, že reference obsahuje pole, musí se toto pole stáhnout, modifikovat a celé nahrát znovu do simulátoru, což je neefektivní. Největším potenciálním problémem tohoto způsobu je však možnost uvést simulátor do nekonzistentního stavu, protože modifikuje přímo proměnné, s kterými simulátor pracuje. Pokud tedy tento přístup používáme nezodpovědně, snadno může dojít k poruše simulátoru, či jinému neočekávanému chování.

Druhou o něco lepší metodou je zasílání příkazů do simulátoru. Každý příkaz má pouze jméno (v podobném tvaru jako reference). Jelikož je posílání příkazů bezpečnější z důvodu nemožnosti uvést data simulátoru do nekonzistentního stavu, jednalo se o preferovanou možnost. Pro všechny potřebné funkce rozhraní tyto příkazy často neexistovaly, takže nebylo možné kompletně vyloučit první popisovaný způsob modifikace dat. Funkce pro zaslání příkazu nebyla v knihovně ve verzi pro Python3 přítomna, proto byla tato funkce do knihovny doplněna. Podklady pro realizaci doplnění byly v diskuzi repositáře knihovny X-Plane Connect [18]. Ke kódu v příloze proto autor přiložil i tuto modifikovanou knihovnu. Ukázky příkazů jsou na obrázku 5.2 vyznačeny zelenou barvou.

View

Tato část rozhraní byla implementována za pomoci jazyka QML, což je značkovací jazyk pro uživatelská rozhraní. Jedná se o deklarativní jazyk s vkládaným JavaScript kódem, který obstarává funkční prvky uživatelského rozhraní. V rámci tvorby rozhraní byl využíván modul Qt Quick, který obsahuje základní komponenty pro tvorbu uživatelských rozhraní. Obrázek 5.3 představuje ukázkou editoru.

Tato část programu byla rozdělena do dvou částí - základní komponenty (ručičkové přístroje, přepínače atd.) a jednotlivé moduly, které tyto komponenty skládají do celku. Moduly jsou pak přepínány pomocí hlavního okna. Jednotlivé moduly jsou diskutovány na konci kapitoly.



Obrázek 5.3: QtCreator s přidávným QML grafickým modulem pro snadný vývoj UI.

Controller

Řídící logika programu je napsána v programovacím jazyce Python. V programu jsou Controllery rozděleny na zobrazovací a ovládací část. Při komunikaci z View části směrem ke Controlleru jsou využívány sloty a při opačné komunikaci jsou použity signály².

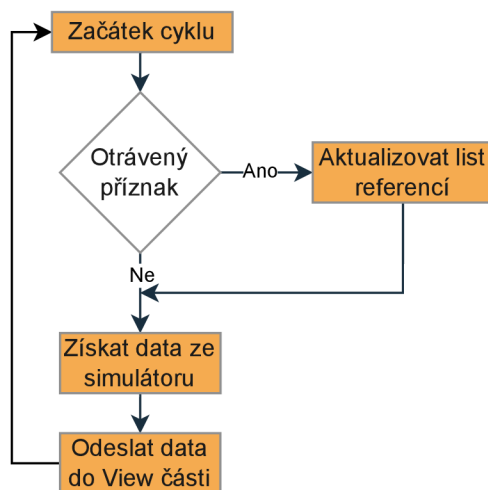
Jak již bylo zmíněno, model se dorozumívá pomocí referencí v simulátoru. Pro aktualizaci dat byla vytvořena smyčka, která průběžně stahuje data ze simulátoru. Vzhledem ke zvolenému přístupu získávání dat ze simulátoru (aktivní doptávání se na reference) bylo nutné tento proces co nejvíce zefektivnit.

Byla tedy vytvořena procedura na získávání referencí. Každý modul má přidělený podcontroller, který je zodpovědný za aktualizaci dat v daném modulu. Zmíněné podcontrollery jsou ovládány hlavním vykreslovacím Controllerem, který na základě uživatelské interakce vybírá, které podcontrollery bude obsluhovat.

Každý renderovací podcontroller obsahuje dvě hlavní metody - jedna vrací list vyžadovaných referencí, druhá slouží pro zpracování získaných referencí ze simulátoru.

Pokud uživatel vybere jiný modul, seznam vyžadovaných referencí dostane otrávený příznak a při dalším průchodu renderovací smyčkou dojde ke znovuzískání názvů referencí od všech nově potřebných podcontrollerů. Takto získaný seznam referencí je následně zbaven duplicitních položek a odeslán do modelové části, kde se seznam zabalí a odešle do simulátoru. Po přijetí požadovaných dat od simulátoru se data uloží podle názvu do slovníku a jsou postupně roz distribuovány do jednotlivých podcontrollerů (viz obrázek 5.4).

Tento přístup zajišťuje, že se program dotazuje pouze na reference, které jsou v daném modulu potřeba a zároveň se všechny reference odesílají najednou. Uvedený přístup však není optimální a ideálním řešením by byl pouze pasivní příjem dat od simulátoru (bez aktivního doptávání). V případě použití pasivního příjmu dat by ale vznikla potřeba udělat vlastní modifikaci simulátoru, která by tuto činnost prováděla (X-Plane 11 simulátor umí bez modifikace distribuovat pouze základní reference simulátoru). Nicméně v této prototypovací fázi poskytuje použitý přístup velkou škálu variability, která je při tvorbě rozhraní potřeba.



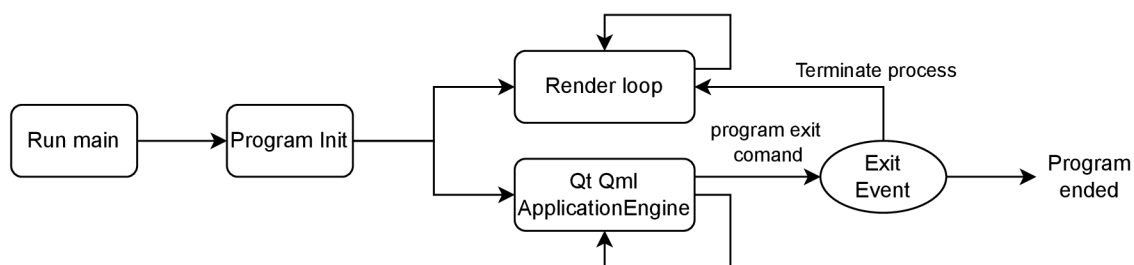
Obrázek 5.4: Schéma renderovací smyčky ukazující průběh vykreslovacího cyklu.

²Sloty a signály jsou konstrukce představené firmou Qt sloužící pro komunikaci mezi objekty programu.

Vzhledem k faktu, že tato smyčka musí běžet neustále, hledal autor prostředky, jak tohoto chování docílit. Pokud smyčka bude uzavřena do nekonečného cyklu, rozhraní by přestalo odpovídat, což je nežádoucí. Problém tedy musel být řešen jiným způsobem. V raných fázích vývoje byla smyčka realizována pomocí časovače, který cyklicky za určitý čas volal renderovací funkci.

Tento přístup se však ukázal být nevhodný. V případě, kdy simulátor přestal chvilkově odpovídat, časovač nedokázal jednotlivé požadavky na obnovení rozhraní vyřizovat dostatečně rychle a tím plánovací frontu časovače zahltit, což vedlo k nekorektnímu fungování.

Z tohoto důvodu byla smyčka zhotovena jako samostatný proces, která v nekonečném cyklu obnovuje data pro rozhraní. Tento proces je spuštěn v inicializační části programu a ukončen je až ve chvíli, kdy nastane ukončující událost (viz obrázek 5.5). Tím se využije maximálního potenciálu knihovny, přes kterou je řešena modelová část programu. Ve vývojových podmínkách bylo měřením zjištěno, že tímto přístupem je možno zajistit obnovovací frekvenci dat až 60 Hz, což je dle úsudku autora pro testovací použití dostačující.



Obrázek 5.5: Zjednodušený model programu ukazující rozdělení programu na dva procesy.

5.3 Jednotlivé části rozhraní

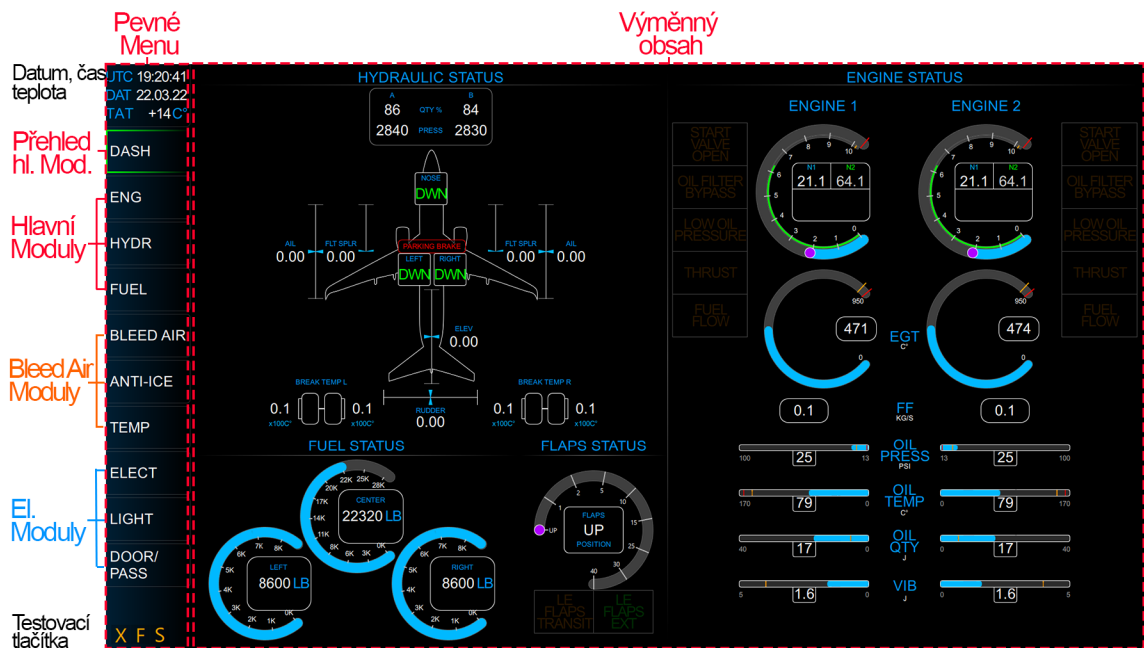
5.3.1 Hlavní moduly letounu

Tato skupina modulů obsahuje nejdůležitější systémy letounu. Konkrétně se jedná o panely pro motory, hydrauliku a palivo. Nejdůležitější prvky těchto panelů jsou obsaženy v přehledu.

Přehled

Jedná se o hlavní panel navrženého rozhraní. Předpokládá se, že bude zobrazen po většinu času pilotáže, proto jsou zde přítomna klíčová data z hlavních modulů. Panel je koncipován tak, aby se interpretace klíčových dat příliš nelišila od modulů, ze kterých jsou prvky vyňaty. Pilot si tak nemusí zvykat na dvojitou reprezentaci totožných dat. V některých případech se povedlo zachovat i rozmístění těchto dat. Při přechodu z přehledového modulu do některého z hlavních modulů tak rozhraní budí dojem, že je vyměněna pouze ovládací část modulu.

Na pravé straně panelu se nachází údaje pocházející z motorových jednotek. Na straně levé se nachází přehled hydraulického modulu, indikátor stavu paliva z palivového modulu a aktuální pozice vztlakových klapek. Detailněji budou prvky probrány v popisech modulů dané sekce. Viz obrázek 5.6.



Obrázek 5.6: Ukázka rozhraní s popisem uspořádání jednotlivých modulů v menu.

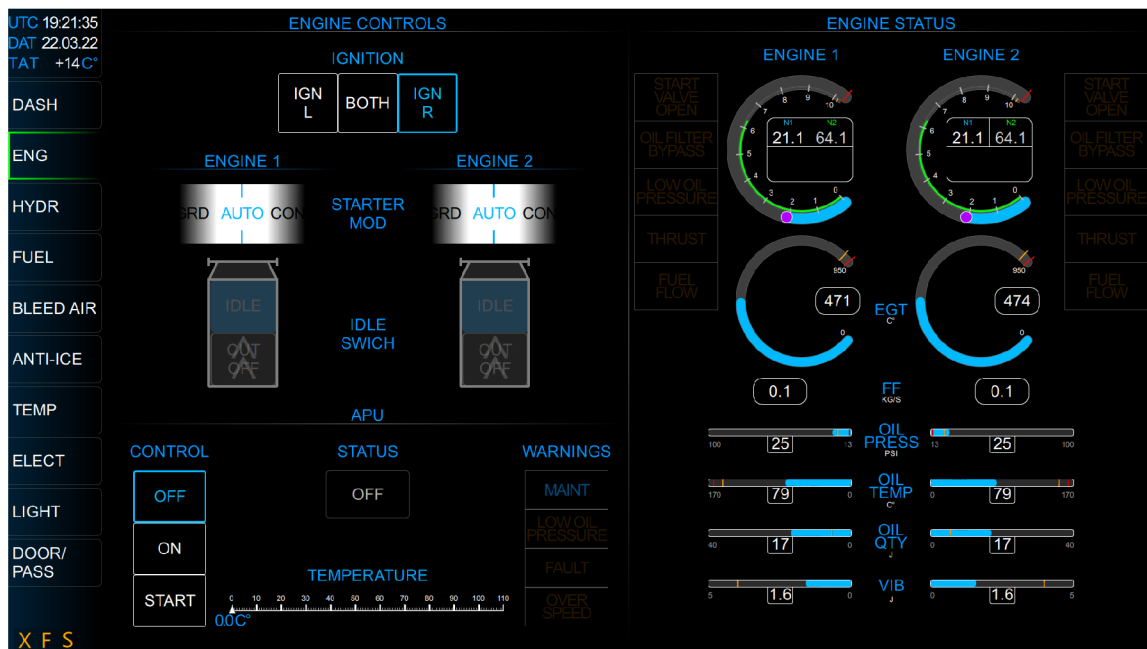
Správa motorů

Tento modul má za úkol spravovat pohonné jednotky letounu. K modulu bylo přidáno ovládání APU. Standardně se s ovládacími prvky manipuluje při spouštění a vypínání letounu. Občas je v případě průletu deštěm či sněhem potřeba mírně modifikovat ovladače zapalování.

Modul je rozdělen na dvě části. Pravá část obsahuje údaje o motorech, kde nejdůležitější údaj je multifunkční přístroj úplně nahoře, který zobrazuje údaje N1 a N2, což jsou otáčky turbín motoru vyjádřené v procentech maximálních otáček dané turbíny. N1 symbolizuje otáčky nízkotlakové turbíny, která je spřažena s velkým kompresorem v přední části motoru. N2 jsou otáčky vysokotlaké turbíny nacházející se uprostřed motoru [1]. Rychlost N1 se používá pro nastavení rychlosti motoru, a proto je analogová reprezentace ztvárněna několikanásobně širší oproti N2. Nastavená rychlost motoru je zobrazena pomocí fialového kruhu. Dále tento přístroj obsahuje pole pro indikaci abnormálních stavů, jako je selhání motoru, stavu "Motoring" a aktivaci obraceče tahu.

Další ukazatele jsou již triviálního ražení - teplota výstupních plynů EGT, průtok paliva FF, vibrace motoru, tlak, teplota a množství oleje. Některé ukazatele mají indikovány kritické hodnoty, při jejichž překročení by měly být provedeny určité úkony. Tyto meze jsou vyznačeny na stupnici barevným pruhem (oranžová má varovací účel, červená značí kritický stav). Ovládací část tvoří levou polovinu modulu. Nejčastější použití této části bude při spouštění motorů a APU. APU se spouští pomocí třípolohového přepínače - po přepnutí do polohy "START" nastává automatické spuštění.

Standardní spouštěcí procedura motoru se provádí po obstarání zdroje stlačeného vzduchu (bleed air) a to buď pomocí APU nebo se využije externí zdroj (více o Bleed air bude zmíněno dále). Poté se u startéru motoru zvolí pozice "GRD", čímž motor započne startovací sekvenci. Po skončení motoringu se přepne přepínač volnoběhu do pozice IDLE. Poté se do motoru začne dodávat palivo. Po dosažení stabilních otáček je startovací sekvence motoru dokončena. Proces se poté opakuje pro druhý motor [9, 40]. Viz obrázek 5.7.



Obrázek 5.7: Modul na ovládání motorů letounu.

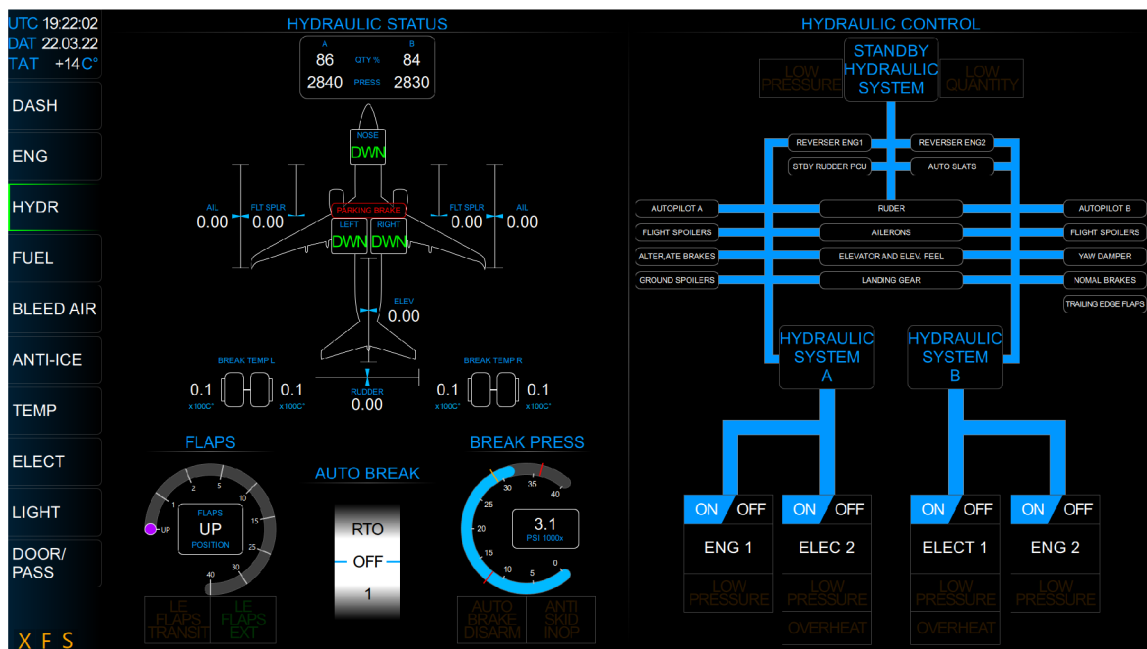
Hydraulický modul

Funkce modulu je ovládání hydraulické části letounu. Kvůli redundanci je systém hydrauliky rozdělen na dva hlavní okruhy a jeden tzv. pohotovostní okruh. Každý hlavní okruh je natlakován pomocí dvojice pump. Jedna je elektrická a druhá je mechanicky poháněna přímo z motoru. Elektrické pumpy jsou napájeny z generátoru elektrické energie protějšního motoru, což každému okruhu zajišťuje alespoň jednu funkční pumpu v případě výpadku jednoho motoru. Stav hydraulických okruhů lze vydedukovat díky ukazateli tlaku (pokud je nízký či nulový, tlak není dostatečný pro provoz systému). Důležité je také monitorovat stav nádrží hydraulické kapaliny [2]. Tyto stavové veličiny se nacházejí v přehledné tabulce na levé straně modulu.

Každý okruh obstarává funkčnost určité množině ovládacích prvků. Tyto jednotlivé systémy jsou do modulu naznačeny pro případ ztráty tlaku v jednom okruhu. Pilot je poté schopen snadno identifikovat s jakými systémy již není možné počítat bez použití manuálu. Tyto prvky se nacházejí na pravé straně spolu se spínači hydraulických pump zmíněných v předešlém odstavci.

Na straně levé je grafický model letounu s indikátory výchylek jednotlivých ploch. Ty mohou posloužit jako vodítko v případě neočekávaného zhoršení dopadu řízení letounu. Do tohoto schématu jsou zakomponovány ukazatele stavu podvozkových nohou a ukazatele teploty brzd přítomných na zadních podvozkových nohách.

Do modulu byla také doplněna komponenta ukazující tlak v brzdových válcích (pokud je tlak abnormální, je přístroj podbarven barvou podle stupně závažnosti). Brzdový systém tohoto letounu disponuje asistentem pro automatické brzdění po přistání. U tohoto systému se nastavuje intenzita brzděné síly, která je následně použita po přistání nebo v případě zamítnutí vzletu (RTO). Viz obrázek 5.8.



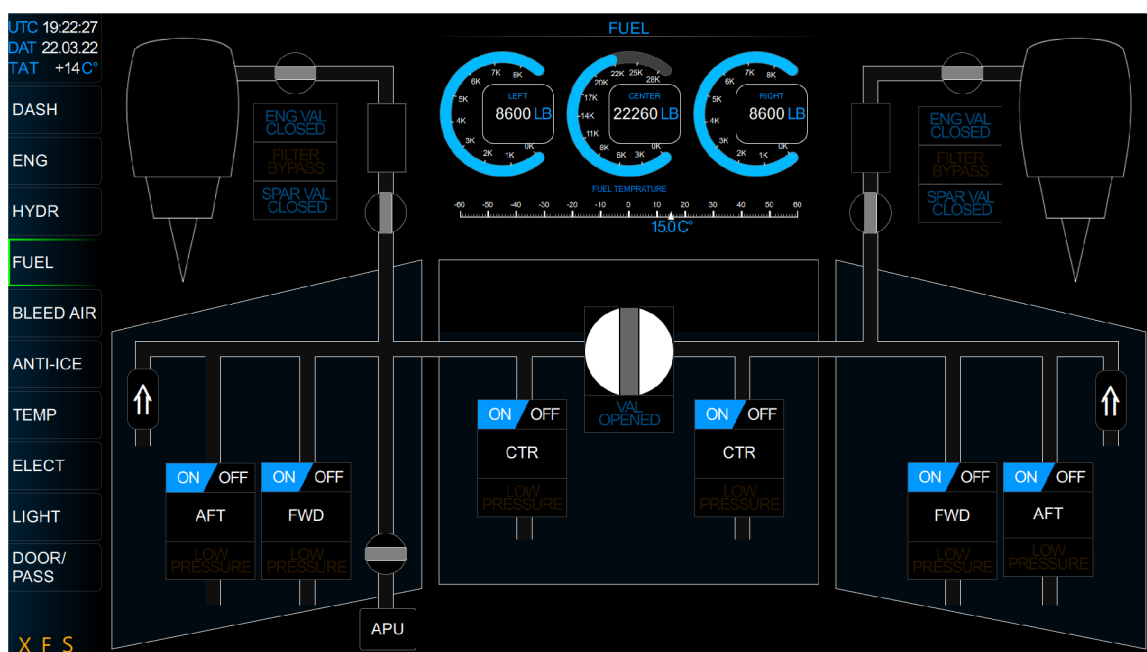
Obrázek 5.8: Modul ovládající hydraulické systémy letounu.

Palivový modul

Tento modul kombinuje ukazatele paliva a systém pro čerpání paliva. Tyto dva systémy spolu souvisejí kvůli potřebě mít nádrže vyvážené. Pokud dojde k nevyváženému stavu nádrží, musí se čerpat palivo do motorů z nádrže, která má paliva více vůči ostatním nádržím. Pro korektní konfiguraci letounu je potřeba v jednotlivých nádržích mít palivo v poměru daném tabulkami [4].

Díky většímu prostoru na zobrazení systému (na rozdíl od historické předlohy) bylo možné zakomponovat důležité prvky systému, které by jinak byly dostupné pouze z pilotního manuálu nebo z některého ze schémat systému. Jedná se například o vyobrazení obtokových ventilů, které v případě výpadku všech pump dokáží z hlavních nádrží odčerpávat palivo. Zahrnuta byla i reprezentace APU, která má za úkol podvědomě navést pilota na fakt, že v případě dlouhého provozu této jednotky a nezapnutí čerpadel z centrální nádrže, může tento provoz způsobit nevyvážení nádrží a tím způsobit komplikace.

Díky těmto doplňkovým informacím by pilot mohl porozumět těmto systémům i bez hlubšího studia podrobností. Viz obrázek 5.9.



Obrázek 5.9: Modul pro kontrolu a správu palivového ústrojí letounu.

5.3.2 Moduly operující se stlačeným vzduchem

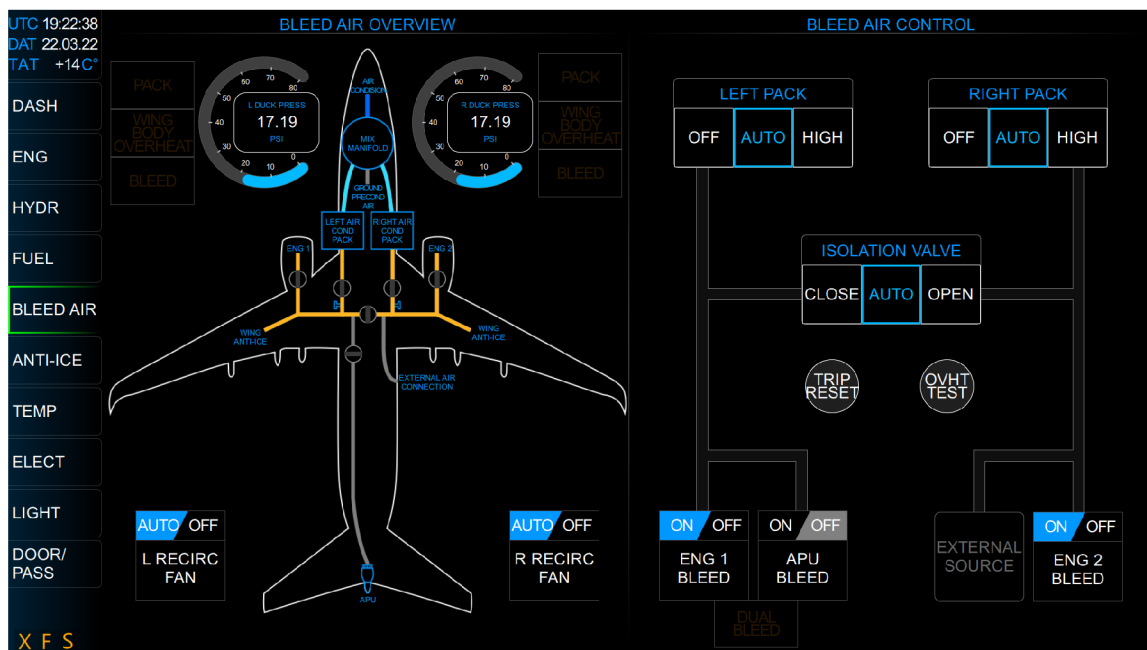
Tato skupina modulů manipuluje se stlačeným vzduchem získaným z 5. a 9. stupně motoru nebo z APU (na zemi může být získán i z externího zdroje). Tento získaný vzduch je horký (cca 200 °C), proto se využívá například pro odstranění námrazy nebo při vytápění kabiny letounu [11].

Bleed air modul - distribuce

Modul má za úkol pomocí sady elektronických ventilů roz distribuovat stlačený vzduch do systémů letounu. Tento systém je kvůli ochraně proti výpadku rozdělen na dva okruhy. Každý okruh získává stlačený vzduch z jednoho motoru. Levý okruh navíc může využít jednotku APU jako zdroj stlačeného vzduchu (toho je využíváno při startu motorů - motor potřebuje stlačený vzduch pro zavedení do běhu). I když jsou okruhy separovány, mohou být spojeny pomocí spojovacího ventilu [11].

Modul byl zkoncipován pomocí již použitého vzoru, kdy je na levé půlce grafický náčrt letounu, ve kterém je osazena abstraktní reprezentace daného systému. Podle stavů systému se tento grafický model dynamicky mění. Pokud danou částí proudí horký vzduch, je tato část vyplněna kontrastní barvou. Pilot by tedy měl snadněji rozpoznat stav systému.

Na pravé půlce jsou ovládací prvky, které ovládají ventily v rozvedech tohoto systému. Tyto prvky respektují historickou předlohu a skládají se z jednoduchých spínačů. Viz obrázek 5.10.



Obrázek 5.10: Modul ovládající distribuci stlačeného vzduchu.

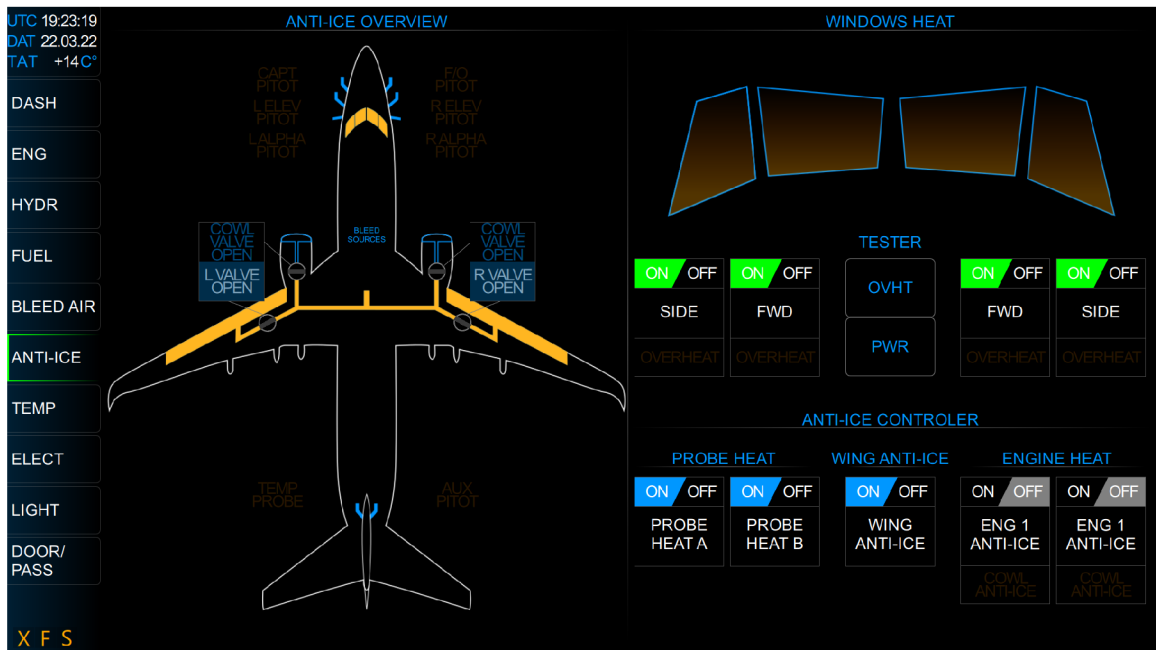
Anti ice

Modul Anti ice obsluhuje systémy sloužící proti neblahým účinkům nižších teplot nebo deště, kterým musí letoun čelit. Systém je rozdělen na dvě části. Jedna se zabývá vyhříváním velkých částí letounu díky stlačenému vzduchu a druhá část vyhřívá malé části letounu za pomoci elektrického proudu.

První zmiňovaný systém se používá, pokud venkovní teplota spadne pod rosný bod a hrozí námraza na náběžné hraně křídla. Tím by se mohla značně ovlivnit aerodynamika, která by mohla vést k neočekávanému zvednutí pádové rychlosti. Další neblahý účinek námrazy je vznik kusů ledu na přívodech do motoru, které by mohly být vtaženy do útrobu motoru a tím motor poškodit. Proto jsou hrany motoru vyhřívány [5]. Tyto systémy jsou vyznačeny na modelu letounu spolu s odpovídajícími ventily podobně jako u předchozího modulu, pokud tudý proudí vzduch je tato část podbarvena.

Druhým zmiňovaným systémem je vyhřívací systém venkovních senzorů, který by měl být zapnut před letem a měl by být aktivní po celou dobu letu. Pokud je vyhřívání vyřazeno z provozu, mohl by senzor vysílat do leteckých systémů zkreslená data. Když tento scénář nastane, měla by být snížena letová hladina pod určitou hranici. V modelu letounu jsou tyto senzory vyznačeny a v případě poruchy vyhřívání je na ně upozorněno varováním.

Systém pro vyhřívání oken v pilotní kabině je důležitou součástí letounu, která mimo ochrany před zamlžením poskytuje také lepší ochranu před pevnými projektily (například ptáky). V případě nárazu je vyhřáté okno pružnější a tím pádem i odolnější než okno prokřehlé mrazem. Jednotlivá okna byla graficky vyobrazena a změna stavu vyhřívání okna je tím více vizualizována. Tento systém je potřeba před letem otestovat a k tomu slouží testovací přepínač. V případě poruchy vyhřívání je nutno omezit rychlost a letovou výšku [23]. Viz obrázek 5.11.



Obrázek 5.11: Modul ovládající odmrazování letounu.

Ovládání regulátorů teploty

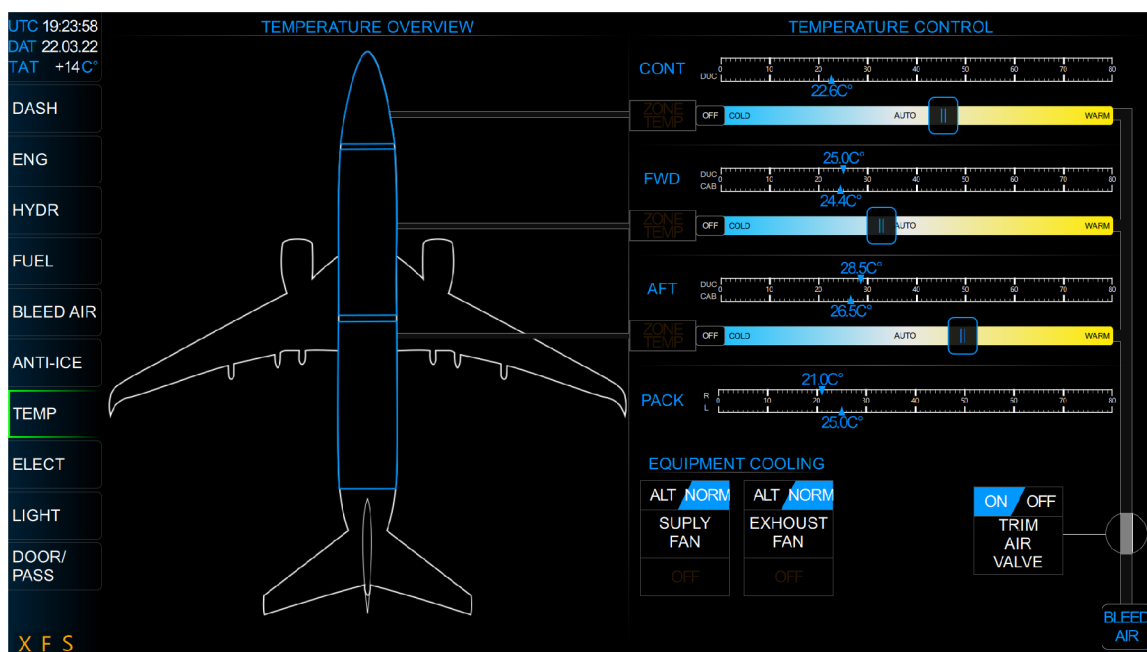
Systém prezentovaný tímto modulem má za úkol regulovat teplotu v obytných prostorách letounu. Využívá k tomu horký vzduch získaný z motorů, který je ale příliš horký pro přímou distribuci do kabiny. Proto je tento vzduch ochlazen pomocí chladičů nazývaných pack. Takto zchlazený vzduch je vháněn do jednotlivých sekcí letounu. Aby se teplota dala regulovat, je tento chladný vzduch v určitém poměru promíchán s horkým vzduchem z motorů. Tento poměr se dá nastavit pro každou sekci zvlášť [10].

Každá sekce je ovládána vlastním pojezdníkem, kterým se poměr horkého a studeného vzduchu nastavuje. Pro přímou interakci a zpětnou vazbu je ke každému posuvníku doplněn ukazatel teploty. Tento ukazatel obsahuje dvojici hodnot - teplota z výstupu distribučního potrubí a teplota v samotném interiéru.

Při vytváření pojezdníku byl autor inspirován implementací podobného prvku v automobilech, kde daný prvek funguje poměrně přesně a spolehlivě. Pro orientaci pojezdníku míchaného vzduchu byl použit gradientní přechod, který má zajistit intuitivní rozlišení, jakým směrem se teplota přidává/ubírá.

V původní reprezentaci je pouze jeden analogový přístroj zobrazující teplotu z jednotlivých teplotních čidel. K tomuto ručičkovému přístroji se musí zobrazovaná data vybírat ručně pomocí pozičního spínače. To je ovšem nepohodlné a zdržující. Proto jsou k jednotlivým ovládacím pojezdníkům přidány korespondující ukazatele jednotlivých teplot.

Další ovládací prvky tohoto modulu jsou spínače volící nasávací a odsávací ventilátor pro chlazení palubních systémů letounu. Tyto ventilátory zajišťují cirkulaci vzduchu mezi kabinou a prostorem pro palubní systémy letounu. Spínače volí jestli bude použit hlavní ventilátor nebo alternativní (pilot typicky použije alternativní v případě poruchy hlavního ventilátoru). V poslední řadě je zde přítomen vypínač systému pro míchání studeného vzduchu s horkým. Pokud je deaktivován, jde do interiéru pevně nastavený poměr vzduchu. Viz obrázek 5.12.



Obrázek 5.12: Modul ovládající teplotu v kabině letounu.

5.3.3 Moduly manipulující s elektrickou energií

Do této množiny systémů byly zařazeny moduly spravující elektrické systémy letounu. Nachází se zde palubní modul řízení distribuce elektrické energie, modul pro ovládání světel letounu a systém monitorování dveří.

Distubuce elektrické energie

Modul zobrazuje dvě skupiny systémů. Jeden systém ukazuje současný stav páteřních elektrických rozvodů letounu a druhý slouží k ovládání této rozvodné sítě.

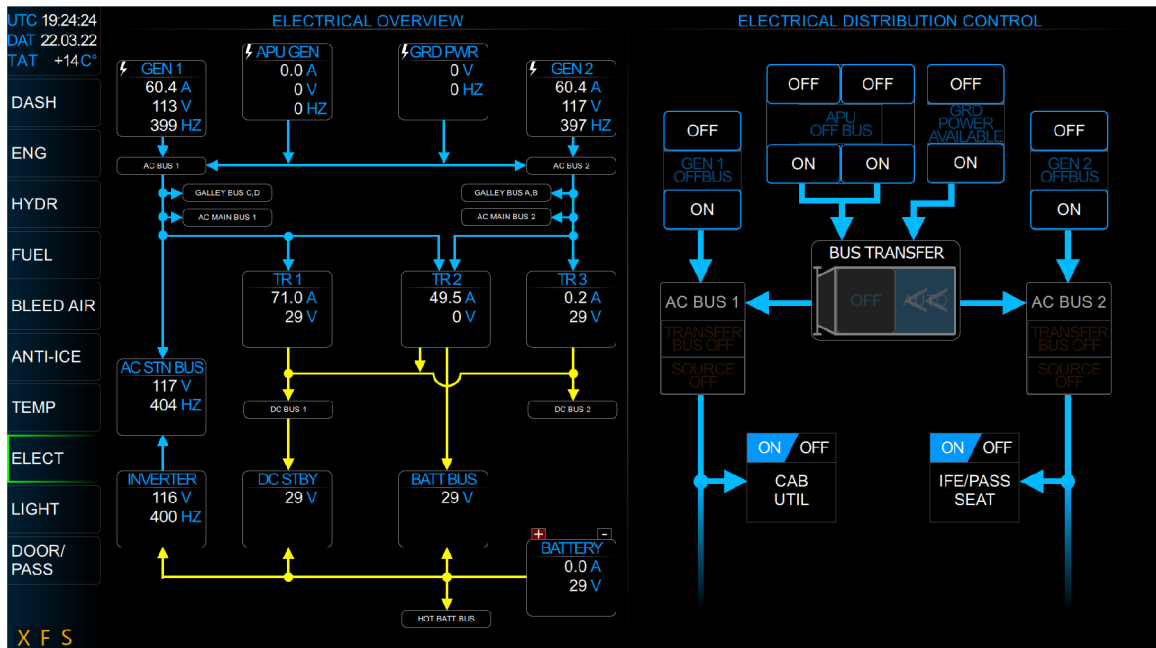
Původní panel zobrazující stav jednotlivých komponent zajišťujících napájení systémů letounu dokázal vyobrazit pouze omezené množství informací, mezi kterými se muselo ručně přepínat polohovým přepínačem, což bylo pravděpodobně nepohodlné a zdlouhavé. Proto bylo autorem navrženo tyto informace interpretovat všechny najednou a to pomocí elektrického schématu. Schéma pro rychlejší orientaci v systému zobrazuje systémové rozvody tak, jak jsou ve skutečnosti zapojené. Schéma je opticky rozdělené na horní a dolní část. Horní část symbolizuje střídavou část sítě (spoje vyznačeny modrou barvou), dolní část slouží k vyobrazení stejnosměrné části schématu (spoje vyznačeny žlutou barvou).

Horní část poskytuje informace ohledně hlavních zdrojů elektrické energie. Tyto zdroje poskytují střídavé napětí, které je distribuované do dvou elektrických větví (BUS). Z těchto větví se napájí systémy závislé na střídavém napětí. Mezi tyto přístroje patří tři měniče napětí sloužící ke konverzi střídavého napětí na stejnosměrné. Tento usměrněný proud poté slouží k napájení stejnosměrných větví elektrického systému (typicky jsou to letové systémy, výpočetní technika na palubě letounu, ...). Tato stejnosměrná část se nachází v dolní polovině schématu. Za povšimnutí stojí připojená baterie, které napájí letoun v případě nepřítomnosti výše zmíněných zdrojů střídavého napětí. Vyznačen je i invertor, který dokáže zpětně přeměnit stejnosměrný proud z baterie na střídavý a tím zajistit napájení standby přístrojů v případě výpadku všech hlavních zdrojů napájení elektrické sítě, což vede k velkému vyčerpání baterie [3, 12].

Všechny důležité komponenty, které poskytují informace o stavu schématu jsou vyobrazeny jako velké čtverce obsahující stavové hodnoty dané komponenty. Kvůli kvantitě těchto hodnot nebyl použit analogový ukazatel. Menší obdélníky obsahující pouze popisný text slouží pro informativní účel - ukazují, jaké elektrické větve systému jsou napájeny a se kterými větvemi nelze počítat v případě výpadku napájení v daném segmentu.

Druhou skupinou přístrojů je ovládání této elektrické sítě. Výše zmíněné zdroje mohou poskytovat svým větvím proud, ale každá větev může být napájena pouze jedním zdrojem. Proto se tento výběr provádí pomocí bezstavového vypínače, který v případě detekce kolize dvou zdrojů předchozí zdroj vypne.

Dostupnost zdroje indikuje upozornění na každém vypínači (pokud je rozsvícen, je daný zdroj dostupný, ale není vybrán). Pokud není žádný zdroj vybrán, rozsvítí se na dané elektrické větvi varování. Přerozdělení elektrické energie do jednotlivých systémů letounu je realizováno automaticky. Okruh pro napájení komfortních funkcí pro cestující je možné manuálně vypnout. Viz obrázek 5.13.



Obrázek 5.13: Modul obstarávající distribuci a správu elektrické energie letounu.

Osvětlení letounu

Jedná se o poměrně jednoduchý modul. Na levé straně se nachází grafická reprezentace osvětlení, na straně pravé je ovládání světel.

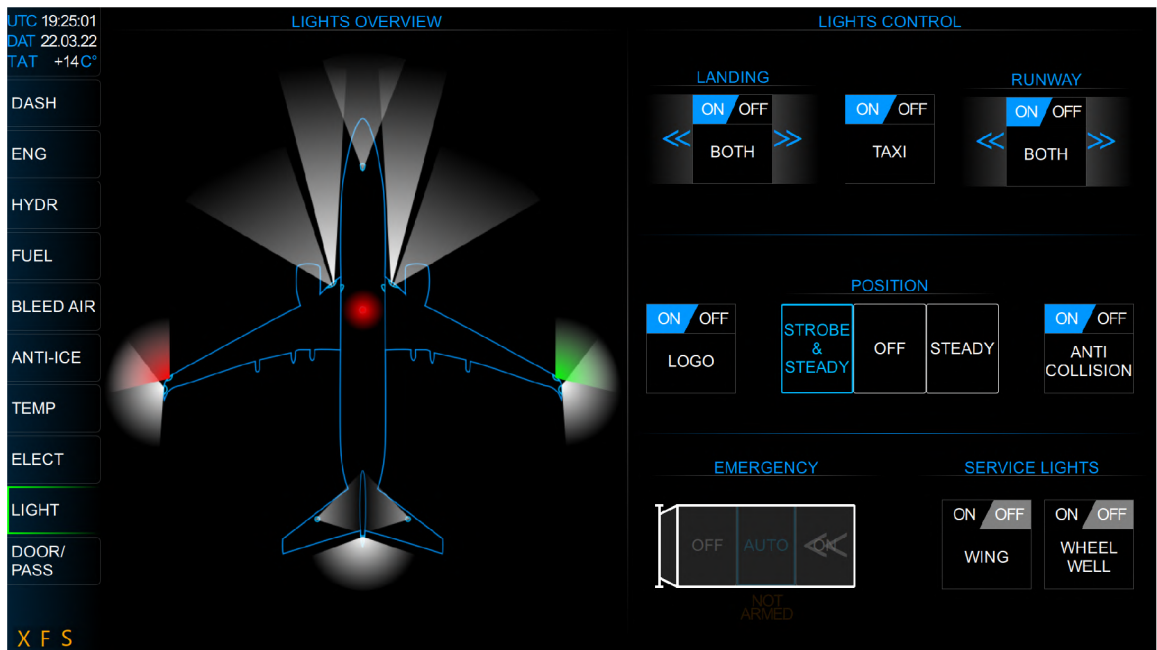
Grafické ztvárnění má zde spíše kosmetickou funkci (neznalost pilota není předpokládána), nicméně může pilotovi přinést lepší zpětnou vazbu, protože při přepnutí přepínače se nezmění jenom stav na přepínači, ale i na grafickém schématu.

Ovládání světel je řešeno triviálními spínači. Pro párová světla byla vytvořena komponenta, která ve výchozím stavu přepíná obě světla naráz. V případě potřeby se může rozdělit na dva samostatné spínače. Tato interakce se provádí podržením tlačítka. Do počátečního stavu se může spínač uvést stejnou procedurou, ale to pouze v případě, že jsou obě tlačítka ve stejném stavu. V opačném případě je spojení zamítnuto. Viz obrázek 5.14.

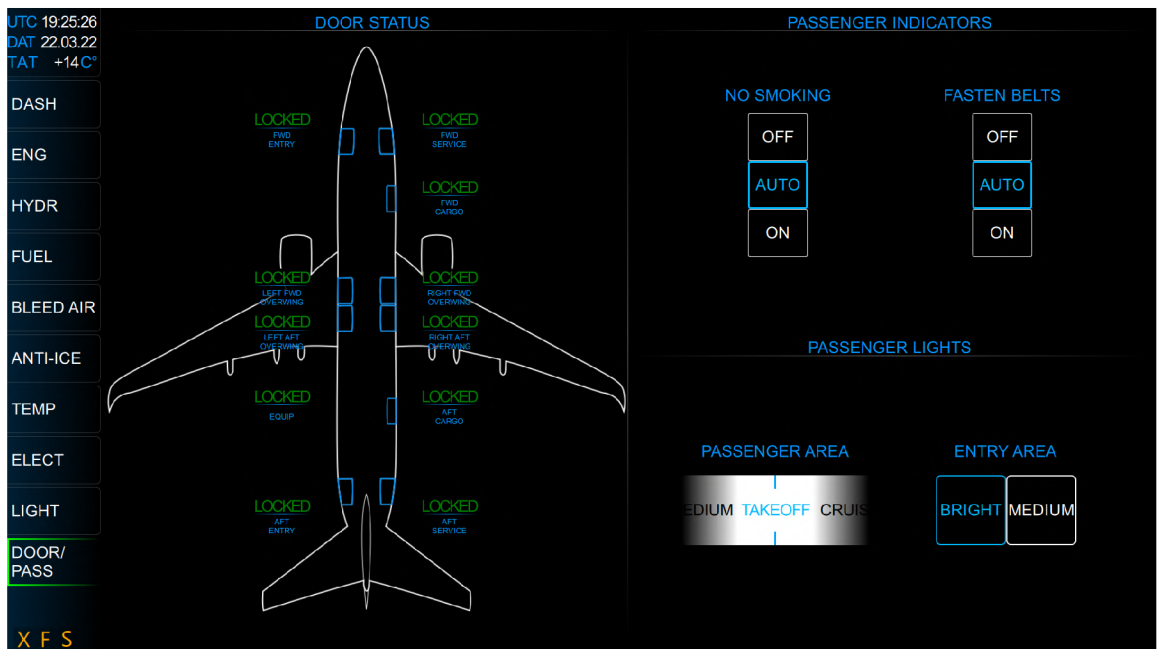
Indikace otevřených dveří

Oproti původní reprezentaci indikace otevřených dveří, která připomínala směs kontrol, se autor snažil o vylepšení této části nadhlavového panelu. Pro stejný model letounu byly graficky ztvárněny jednotlivé dveře. Na první pohled je jasné, které dveře nejsou řádně uzavřeny a pilot ani nemusí číst popis, aby zjistil o jaké dveře se jedná.

Modul je ještě doplněn o ovládání indikátorů v části pro pasažéry a nastavení intenzity interních světel v pasažérské sekci. Viz obrázek 5.15.



Obrázek 5.14: Modul ovládající externí osvětlení letounu.



Obrázek 5.15: Modul zobrazující indikátory otevřených dveří.

Kapitola 6

Uživatelské testování prototypu

Tato kapitola se soustředí na analýzu výsledku implementační části práce za pomoci testování na uživateli. Cílem tohoto testování je ověření cílů daných při návrhu rozhraní a ověření celkové funkčnosti řešení. Hlavním zkoumaným argumentem je, zda je digitální variace lepší než její analogová předloha.

Testovací prostředí

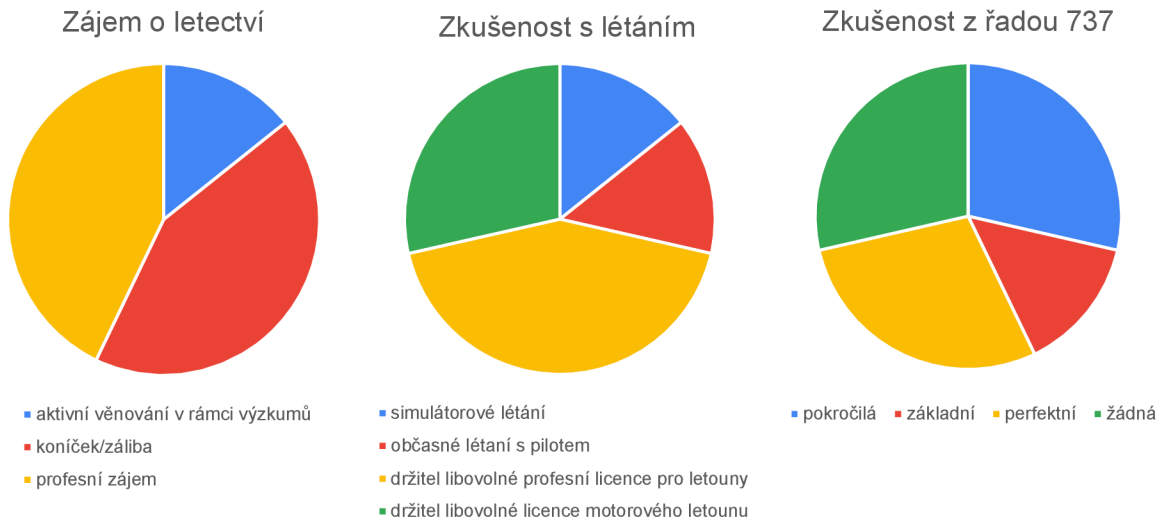
Prostředí pro testy je zachyceno na obrázku 6.1. Na hlavním počítači byl zapnut simulátor X-Plane 11, na vedlejším počítači byl spuštěn vytvořený prototyp, který s hlavním počítačem komunikoval přes LAN. K simulátoru byl pro snadnější řízení letounu připojen joystick. Samotný let ovšem nebyl primárním předmětem testování vzhledem k povaze úkolů, které jsou zaměřeny na pozemní operace, kdy je letoun v klidu. Z uvedeného důvodu byla letová část testu ponechána na bázi dobrovolnosti a měla sloužit pro hlubší seznámení testerů s rozhraním. Uživatelé měli k dispozici papírový checklist A.2, pomocí kterého plnili definované úkony.



Obrázek 6.1: Testovací prostředí používané při testu UI.

Testovací skupina

Velikost testovací skupiny je sedm lidí. Většina členů testovací skupiny byli muži, jejichž věk byl do třiceti let. Zhruba polovina testerů neměla s tímto konkrétním letounem zkušenosti, měli ale zkušenosti s létáním na jiných letounech. Druhou polovinu tvořili profesionální piloti Boeingu 737TM. Toto složení umožnilo vyzkoušet intuitivnost rozhraní u neznalých testerů a pozorovat, jak je složité se naučit se systémem pracovat. U profesionálních dopravních pilotů byla využita jejich velmi dobrá znalost hardwarové předlohy vytvářeného systému a bylo možné pozorovat trénování na nový systém. Detailnější popis skupiny je k nalezení na obrázku 6.2.



Obrázek 6.2: Podrobnosti ohledně testovací skupiny.

Průběh testování

Před testováním byli všichni krátce proškoleni, jak se s rozhraním pracuje a kde jsou jednotlivé ovládací prvky.

Uživatelé byli vystaveni modelovým situacím v simulátorovém prostředí. Šlo konkrétně o zaváděcí proceduru letounu spojenou s předstartovním postupem a proceduru po přistání spojenou s vypnutím letounu. Jedná se tedy o pilotní rutiny, které pilot provádí běžně. Tyto úkony se provádí za pomoci checklistů (odškrtačích seznamů). Původní checklist byl modifikován pro použití v navrženém rozhraní a to přidáním naváděcích poznámek pro jednodušší orientaci v jednotlivých modulech rozhraní. Pro smysluplnost testu byly z checklistu smazány úkony, které nelze řešit přes nově navržené rozhraní (checklist je k nalezení v příloze A.2). Tyto úkony byly prováděny dvakrát. Jednou na stávající reprezentaci nadhlavového panelu a jednou na autorem navržené variantě.

Po skončení každé části byl uživatelům předložen elektronický dotazník NASA-TLX, ve kterém zaznamenali svůj subjektivní pohled na pracovní zátěž vyžadovanou danými úkoly. Po dokončení všech úkolů testovací subjekt vyplnil hlavní formulář, který se soustředil na analýzu nového řešení jak po funkční části, tak po části estetické. Druhá část formuláře byla věnována přímému porovnání stávajícího a autorova řešení.

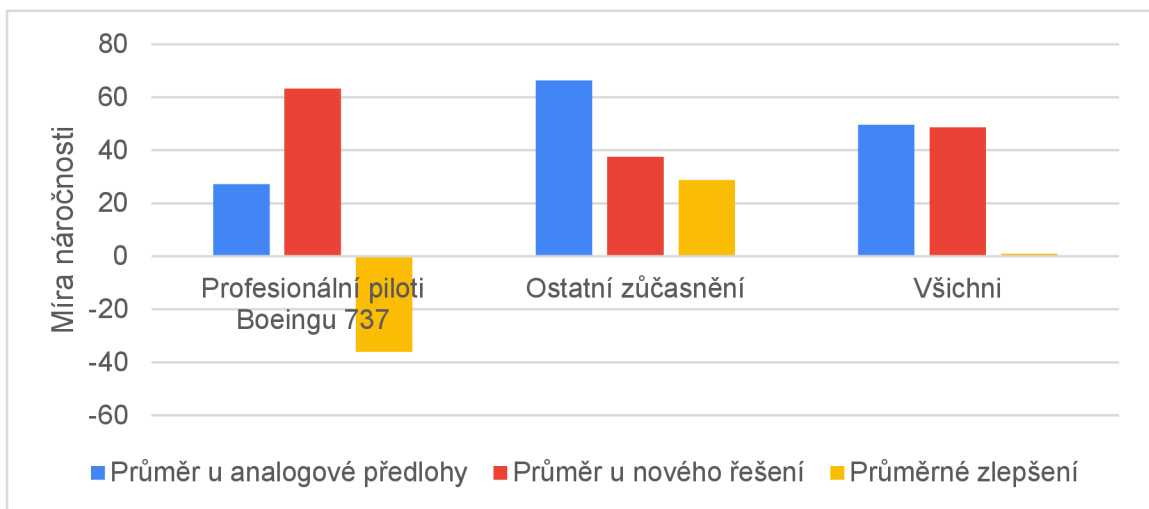
6.1 Analýza výsledků testování

6.1.1 NASA-TLX

První porovnávací metriku tvořila data získaná a zpracovaná za pomoci formuláře NASA-TLX (formulář viz obrázek A.4). Veškeré informace o NASA-TLX, uváděné v této sekci, vycházejí z oficiálních informací přítomných zde [17]. Tento formulář vznikl za účelem subjektivního posouzení pracovní zátěže. Skládá se celkem z šesti otázek popsaných níže. Na tyto otázky se odpovídá pomocí škálovatelné stupnice od 0-100, kde nižší hodnota daného aspektu znamená menší náročnost, lepší výkonost atd. Z každé otázky tester uvedl dvě hodnoty - první z posouzení analogové varianty a druhou z autorem vytvořené digitální verze. Míra zlepšení/zhoršení byla kvůli individuálnímu citění každého testovaného jedince provedena za pomoci průměru rozdílů subjektivních hodnot. Nejedná se tedy o rozdíl průměrných hodnot. Při zpracování výsledků bylo zjištěno, že údaje získané od profesionálních pilotů se markantně liší od ostatních testovaných subjektů. Z tohoto důvodu jsou jednotlivé analýzy dat děleny podle této skutečnosti.

Mentální náročnost

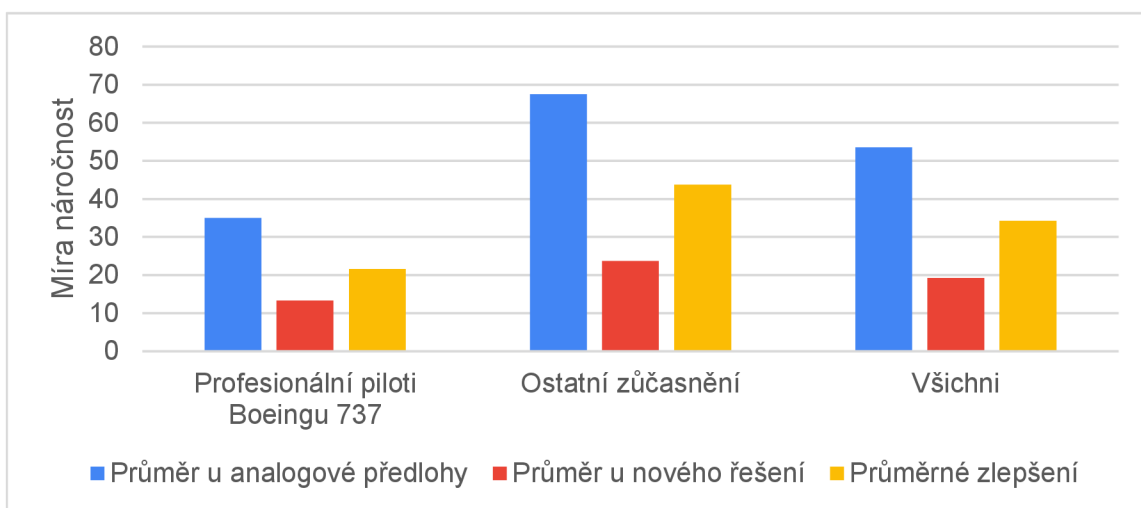
Tento aspekt se zaměřuje na psychickou zátěž kladenou na pilota (jak moc musel uživatel nad úkolem přemýšlet). Z výsledků autor vyvodil, že pilot zvyklý na stávající reprezentaci panelu musí více přemýšlet nad používáním nové digitální verze panelu. Ale neznalý uživatel se dokázal v novém rozhraní zorientovat rychleji, což vedlo k menší psychické námaze než při používání stávajícího řešení. Viz graf 6.3.



Obrázek 6.3: Graf analyzované mentální náročnosti při testování rozhraní.

Fyzická náročnost

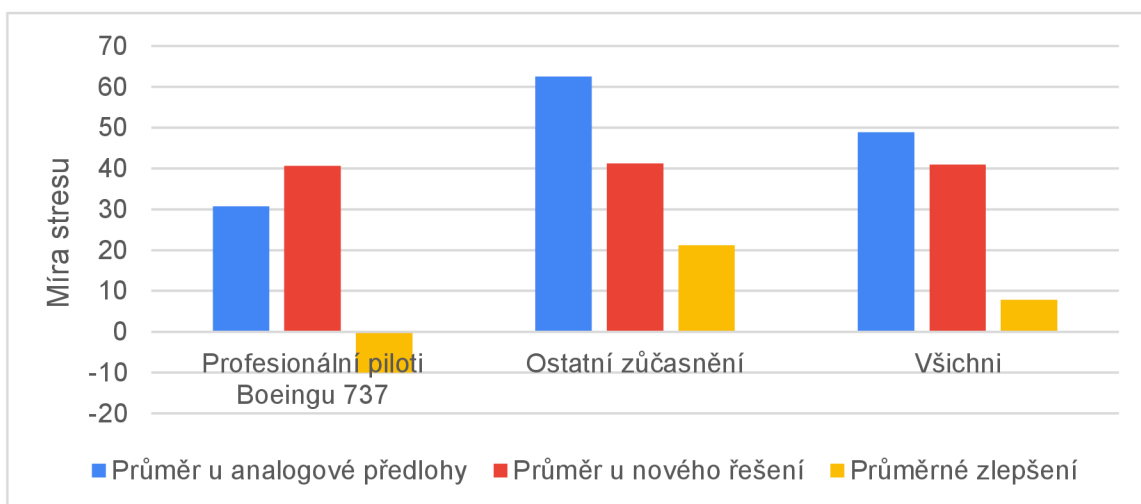
Analyzovanou veličinou u této otázky je míra fyzické námahy vynaložené na splnění úkolu (kolik aktivity musel uživatel vyvinout). Nehledě na profesionální status se u obou testovaných skupin projeví stejné výsledky. Používáním digitálního rozhraní uživatel vynakládal menší fyzické úsilí. Tento aspekt je způsoben koncepcí řešení, kdy má uživatel vše na jednom místě a nemusí tak dělat nepotřebné pohyby navíc, jako u analogové předlohy řešení. Viz graf 6.4.



Obrázek 6.4: Graf analyzované fyzické náročnosti při testování rozhraní.

Stres při plnění úkolu

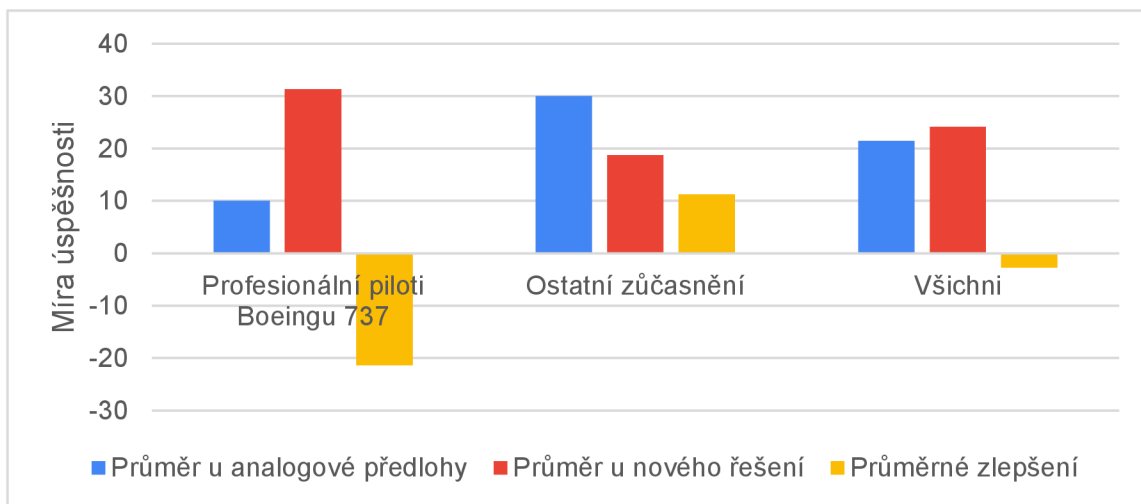
Profesionální piloti vnímali stres při plnění úkolu dosti podobně u obou řešení, u ostatních zúčastněných byl u nově navrženého řešení o úroveň nižší. Sledovanou veličinou u této otázky je, jak moc uživateli připadá úkol uspěchaný. Viz graf 6.5.



Obrázek 6.5: Graf analyzovaného stresu na subjekty při testování rozhraní.

Úspěšnost plnění úkolu

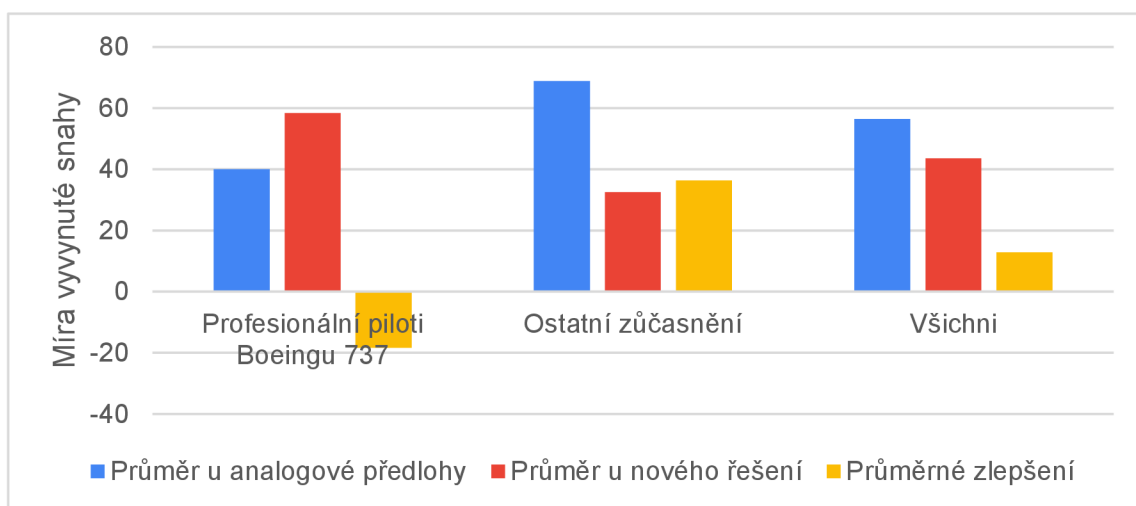
Na otázku, jak jsou si testovací subjekty jistí správným splněním úkolu, odpověděli profesionální piloti větší mírou nejistoty u nového rozhraní. Toto rozhodnutí bylo odůvodněno častým využíváním současného systému, kde jsou si piloti skoro naprosto jistí, že odvedli úkol správně. Neznalé subjekty měly pocit úspěšnějšího provedení úkonů na novém digitálním rozhraní. Viz graf 6.6.



Obrázek 6.6: Graf analyzované úspěšnosti při plnění úkolu v rámci testování rozhraní.

Vyvinutá snaha

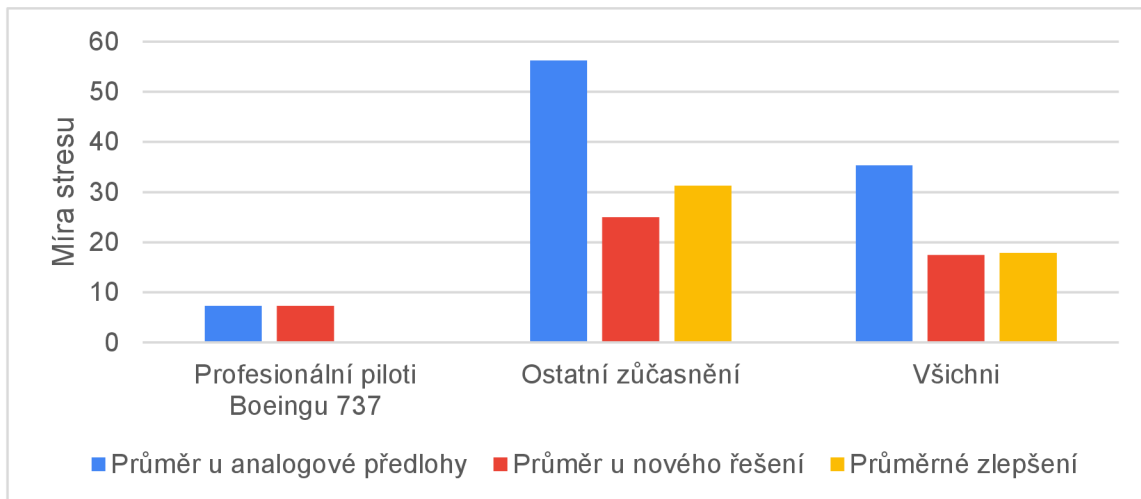
Z analýzy odpovědí na tento aspekt vyplynulo, že profesionální piloti opět kvůli zažitému používání stávající reprezentace vyvinuli menší celkovou snahu pro splnění úkolu na stávajícím způsobu řešení. Ostatní vyvinuli menší snahu při používání nového digitálního rozhraní. Viz graf 6.7.



Obrázek 6.7: Graf míry vyvinuté snahy při plnění úkolu v rámci testování rozhraní.

Frustrace

Analýza míry frustrace ukázala, že profesionální piloti pocítují minimální množství frustrace při provádění běžných úkonů. Neznalí uživatelé však byli frustrováni méně při používání nového digitálního systému. Viz graf 6.8.



Obrázek 6.8: Graf míry frustrace při plnění úkolu v rámci testování rozhraní.

Sumarizace poznatků z NASA-TLX formulářů

Autorem navržené a implementované rozhraní si vedlo v tomto testu poměrně dobře. Uživatelé v průměru testů pocítovali menší nároky na pracovní zátěž, což by mohl být kritický aspekt v případě nasazení tohoto rozhraní do provozu. V některých aspektech si nové rozhraní u profesionálních pilotů vedlo hůře než analogová předloha. Tento fakt je však způsoben novostí rozhraní - piloti mají současnou podobu panelu velmi dobře zmapovanou a jsou na ni zvyklí. Připustili však, že by se tyto aspekty dlouhodobějším používáním pravděpodobně dostaly na podobnou ne-li lepší úroveň než současné řešení.

6.1.2 Hlavní testovací formulář

Jak již bylo zmíněno v přehledu kapitoly, tento formulář byl subjektům předložen na samotném konci testovacího procesu. Je členěn na tři části. Jedna se věnuje funkční stránce rozhraní, druhá je věnována analýze vzhledu rozhraní a třetí část slouží pro přímé porovnání navrženého rozhraní se stávajícím řešením. Všechny mají výrokovou podobu a odpovídá se na něj za pomoci škálovatelné stupnice. Stupnice je tvořena pěti možnostmi, kdy jednička znamená absolutní nesouhlas a pětka znamená absolutní souhlas. Vzhledem k sebevypovídavosti otázek se autor rozhodl z každé části formuláře odtajnit výsledky a následně tyto výsledky souhrnně analyzovat.

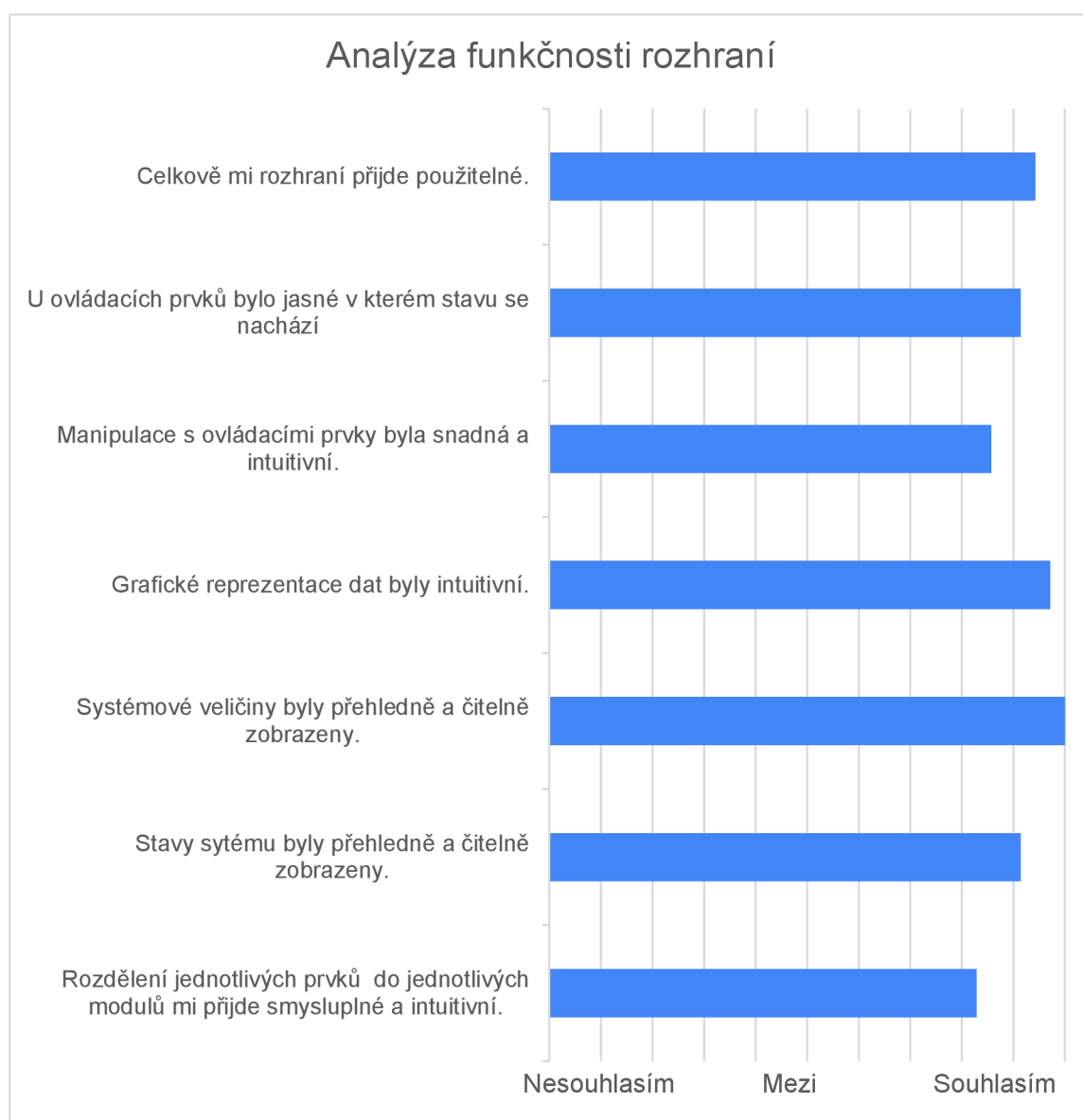
Výsledky tohoto formuláře již nejsou rozděleny na dvě testovací skupiny, protože četnosti u jednotlivých položek jsou u obou skupin podobné.

Část formuláře zaměřená na analýzu funkčnosti rozhraní

Z výsledků této části formuláře je možné usuzovat, že rozhraní splňuje svoji funkci. Uživatelé měli minimální námitky na funkční část rozhraní.

Nejhůře hodnoceným výrokem se stala manipulace s ovládacími prvky. Toto je v rámci pozorování možné potvrdit, protože některé části rozhraní byly méně intuitivní. Za zmínku stojí ovládací kontrolní panel APU, kde při manipulaci s ovládacími prvky často subjekty váhaly, jak se se systémem zachází. To vytváří prostor pro budoucí zlepšení ovládacích prvků rozhraní.

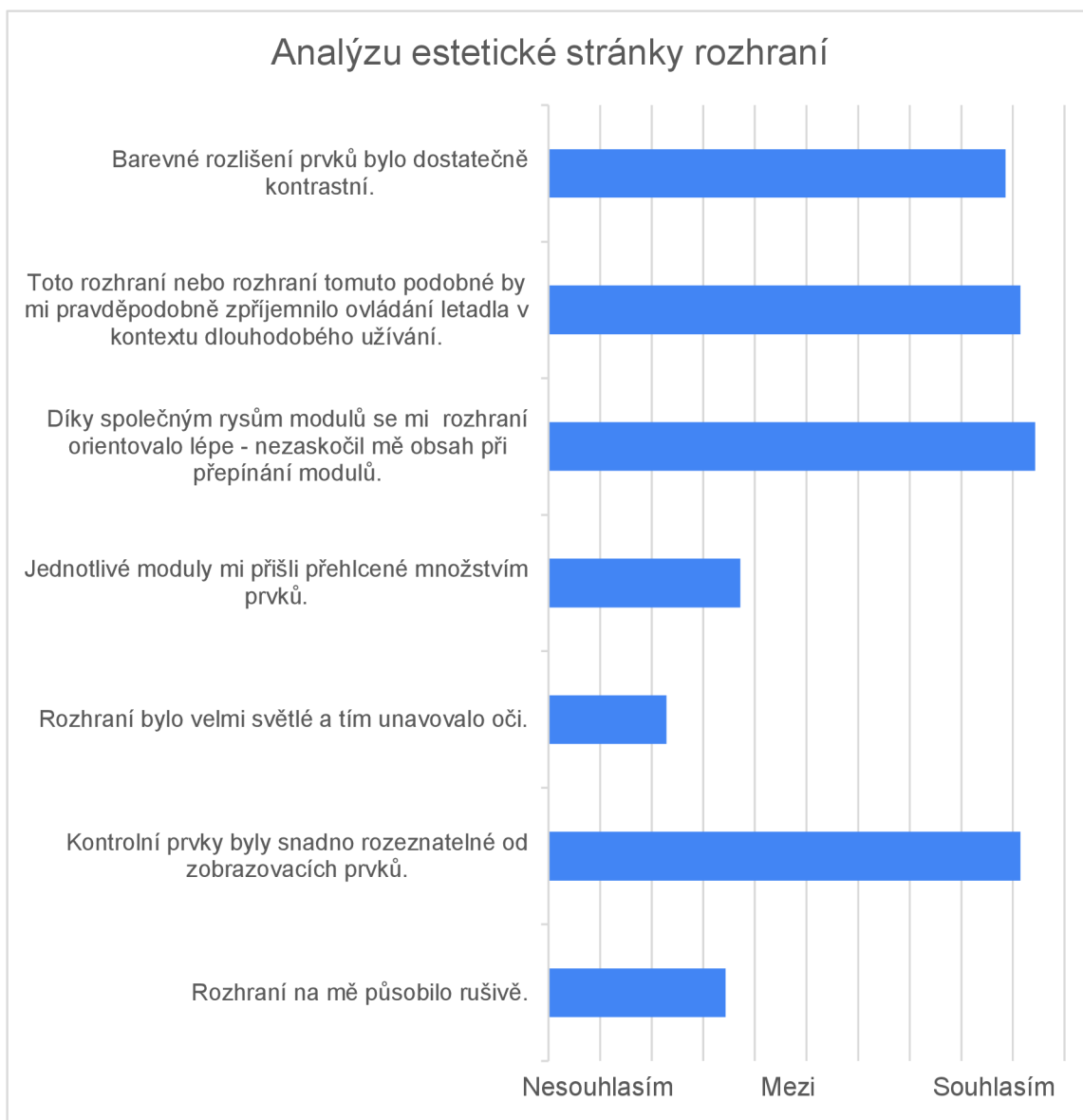
Naopak velmi dobře hodnocenou množinou výroků se staly položky zaměřené na zjišťování funkčnosti grafických schémat. Z výsledků je možné usoudit, že tento styl schémat uživatelům zjednodušuje práci s jednotlivými systémy a bylo by dobré je do takovýchto rozhraní zakomponovat. Viz graf 6.9.



Obrázek 6.9: Grafy zaměřující se na analýzu funkčnosti rozhraní.

Část formuláře zaměřená na estetiku rozhraní

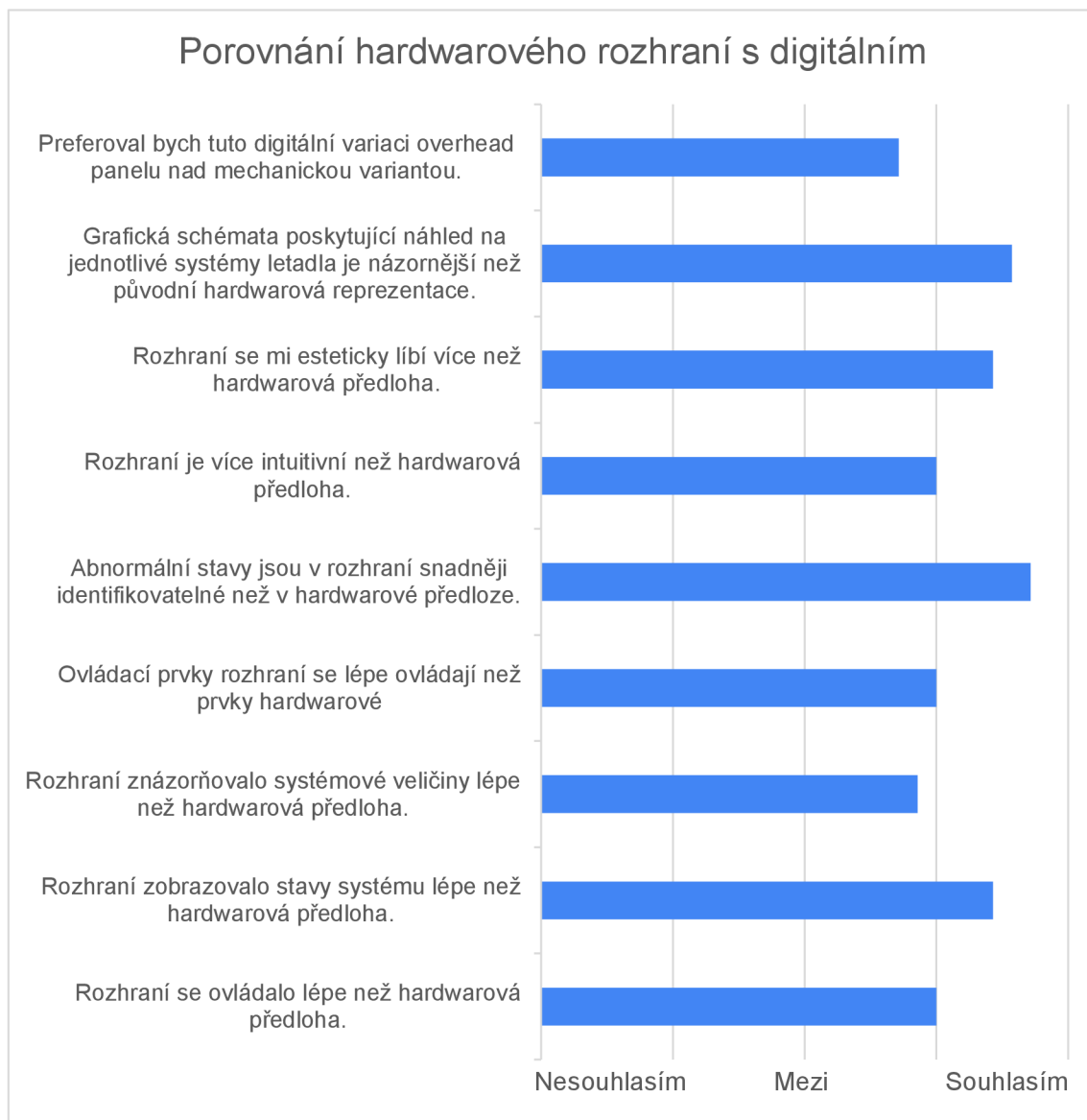
V rámci zpětné vazby uživatelé potvrdili, že rozhraní vyobrazuje jednotlivé prvky dostatečně kontrastně a přehledně. Uživatelům se líbil atraktivní styl moderního rozhraní. Předmětem budoucího vývoje grafického vzhledu rozhraní by byla dokonalejší reprezentace ovládacích prvků, která má dle průzkumu prostor pro budoucí vylepšení. Uživatelé by podobné rozhraní v letounu uvítali. Viz graf 6.10.



Obrázek 6.10: Grafy zaměřující se na analýzu estetické stránky rozhraní.

Přímé porovnání rozhraní

V této části formuláře testované subjekty porovnávaly analogovou variantu rozhraní s novou implementací. Výsledkem průzkumu byla poměrně jednostranná preference nového rozhraní. Nicméně při konečném verdiktu na závěr dotazníku subjekty často zmiňovaly výhody mechanické reprezentace, které by rády do nového rozhraní alespoň částečně přenesly. Konkrétně se jednalo o haptickou odezvu rozhraní, která v dotykové variantě rozhraní zcela chybí. Tento aspekt by byl předmětem dalšího vývoje v rámci zkoumané disciplíny. Viz graf 6.11.



Obrázek 6.11: Grafy zaměřující se na porovnání analogového řešení s nově vytvořeným rozhraním.

Kapitola 7

Možné budoucí směry a vývoj

Podle výsledků testování má toto konceptuální rozhraní potenciál. Přímocárým navázáním by tedy mohla být další vývojová iterace rozhraní a postupné doladování systému. V rámci další iterace by mohly být postupně implementovávány záměrně vynechané systémy letounu. Nicméně je velmi nepravděpodobné, že vyjde další řada Boeingu 737™, a tak by tvorba perfektního systému pro tento letoun, nedávala úplně smysl.

Chytré checklisty

S takto implementovaným rozhraním by dalším krokem mohla být implementace chytrého checklistu, který by buď po odkliknutí položky checklistu sám provedl daný úkol nebo ještě jednodušeji by jednotlivé procedury prováděl autonomně a asistenci by potřeboval pouze v případě abnormálního stavu nebo úkonu, který vyžaduje ke splnění člověka. Tím by se rapidně snížila míra úkonů závislých na pilotovi, a zároveň by se daly jednotlivé úkony lépe kontrolovat. Pokud by se tedy šlo touto cestou, mohlo by toto rozhraní posloužit na další výzkum nových trendů v letectví. Ukázka digitálního checklistu viz. obrázek 7.1.



Obrázek 7.1: Ukázka digitálního checklistu v GPS jednotce pro malé letouny. Převzato z [35].

Rozhraní pro simulátor

V rámci testování rozhraní autor dostal tip od profesionálního dopravního pilota na implementaci rozhraní pro profesionální letecké simulátory. Na těchto simulátorech trénují piloti nejrůznější úkony a rizikové situace. Tuto simulaci obvykle ovládá člověk z kontrolního stanoviště a často piloty monitoruje a kontroluje. Zmenšenina kokpitu na tabletu by byla pro tento účel velice přínosná.

Pro navržené rozhraní by to znamenalo změnu zaměření a výrazné rozšíření množiny implementovaných systémů. V rámci této změny zaměření by bylo vhodné do systému implementovat i nástroje pro řízení samotné simulace jako je ovládání času, počasí a třeba také poruch.

One display cockpits

Tento koncept je založen na konceptuálním návrhu, který se odlišuje od současných moderních kokpitů tím, že disponuje jedinou velkou obrazovkou, na které jsou zobrazeny veškeré informace o letounu. Některé koncepty pracující s touto obrazovkou zacházejí s jednotlivými systémy letounu jako s plovoucími widgety, které se dají po obrazovce volně rozmisťovat. Viz obrázek 7.2.

V rámci navázání na představenou práci by bylo možné nově implementované rozhraní přizpůsobit pro použití v tomto konceptuálním kokpitu a zjistit tak, jaké dopady by tato změna přinesla.



Obrázek 7.2: Konceptuální kokpit s dotykovým displejem. Převzato z [43].

Kapitola 8

Závěr

Tato práce začíná historickým přehledem návrhů kokpitů a zmapováním technologií, ze kterých se dodnes zachovaly historické konvence, které se dodržují napříč všemi výrobci. Dále pak autor popisuje jednotlivé části moderního kokpitu.

Po této rešerši následuje návrhová část práce, kde úvodem autor zdůvodňuje zaměření návrhu. Počátek návrhového cyklu tvoří množina zásad, která byla dodržována v rámci návrhu a implementace rozhraní. Dále následuje tvorba samotného návrhu pomocí drátového modelu, ze kterého byl následně vytvořen grafický model - tento postup je popsán na konci návrhové kapitoly. Návrh byl realizován za pomoci multiplatformního frameworku Qt. Hlavními použitými technologiemi je jazyk Python se sadou PySide6, který tvořil backend aplikace a značkovací jazyk QML, který naopak tvořil frontend aplikace. Implementace byla vytvářena podle návrhového vzoru MVC. Princip funkce jednotlivých fundamentálních částí programu byl vysvětlen a popsán.

Následně bylo věnováno úsilí popisu výsledného produktu v rámci čehož byl každý systém, který nově navržený panel ovládá, velmi zjednodušeně představen a byla vysvětlena jeho funkce. Do tohoto popisu byly zakomponovány implementační detaily každého modulu.

Po hotové implementační části bylo rozhraní otestováno za pomoci série uživatelských testů v simulátorovém prostředí. Zdroje analyzovaných dat obstaraly dva formuláře. Formulář NASA-TLX sloužil na měření subjektivní pracovní zátěže. Z výsledků vyplynulo, že celková míra pracovní zátěže je pro nové uživatele znatelně menší při porovnání nové varianty s analogovou předlohou. U pilotů cílového letounu však nastalo výrazné zlepšení pouze v rámci měření fyzické námahy. Druhý formulář sloužil k zmapování uživatelské zkušenosti s rozhraním a porovnání stávající varianty s nově vytvořenou alternativou. Po zanalyzování výsledků testů z druhého formuláře, dospěl autor k závěru, že nové rozhraní je pro uživatele intuitivnější a přehlednější než mechanická varianta. Zároveň bylo zjištěno, že je potřeba vylepšit ovládací prvky (například vylepšit zpětnou vazbu). Deklarované cíle v návrhové části je možné považovat za splněné a implementační část práce za úspěšnou.

Konec práce tvoří krátká diskuze nad dalším možným navázáním na autorem navržené rozhraní a všeobecně na představenou práci.

Literatura

- [1] AIRPLANEACADEMY. *What are N1 and N2 in Aviation Turbine Engines?* [online]. ©2022 [cit. 2022-04-12]. Dostupné z: <https://airplaneacademy.com/what-are-n1-and-n2-in-aviation-turbine-engines/>.
- [2] BRADY, C. *737 Hydraulics* [online]. Červen 2021. revidováno 2022.4.14 [cit. 2022-04-14]. Dostupné z: <https://youtu.be/yI7v9Lyi0vU>.
- [3] BRADY, C. *Electrics* [online]. Listopad 2021. revidováno 2022.4.13 [cit. 2022-04-13]. Dostupné z: <http://www.b737.org.uk/electrics.htm>.
- [4] BRADY, C. *Fuel* [online]. Listopad 2021. revidováno 2022.4.14 [cit. 2022-04-14]. Dostupné z: <http://www.b737.org.uk/fuel.htm>.
- [5] BRADY, C. *Ice and Rain Protection* [online]. Listopad 2021. revidováno 2022.4.13 [cit. 2022-04-13]. Dostupné z: <http://www.b737.org.uk/iceandrain.htm>.
- [6] DESIGNERRS ACADEMY. *Wireframing in UI/UX Design* [online]. Zář 2020 [cit. 2022-04-18]. Dostupné z: <https://medium.com/detaux/what-is-ui-ux-wireframe-designerrs-46dac9c8a153>.
- [7] JUKES, M. *Aircraft display systems*. Reston: AIAA, 2004. 5–37,84 s. Progress in astronautics and aeronautics ; vol. 204. ISBN 1-56347-657-6.
- [8] KRAMER, L. J., BAILEY, R. E. a PRINZEL, L. J. Commercial Flight Crew Decision Making During Low-Visibility Approach Operations Using Fused Synthetic and Enhanced Vision Systems. *The International journal of aviation psychology*. Mahwah: Taylor & Francis Group. 2009, sv. 19, č. 2, s. 132–133. ISSN 1050-8414.
- [9] LEARN TO FLY. *17. Boeing 737NG - Engine Start & Ignition* [online]. Červen 2020 [cit. 2022-04-13]. Dostupné z: <https://youtu.be/bs9akpI14Sw>.
- [10] LEARN TO FLY. *23. Boeing 737NG - Air Conditioning System* [online]. Červen 2020 [cit. 2022-04-13]. Dostupné z: <https://youtu.be/KhWjYKOGPZo>.
- [11] LEARN TO FLY. *25. Boeing 737NG - Bleed Air System* [online]. Červen 2020 [cit. 2022-04-13]. Dostupné z: https://youtu.be/gVyvQa_yguE.
- [12] LEARN TO FLY. *20. Boeing 737NG - Electrical System* [online]. Červen 2020 [cit. 2022-04-13]. Dostupné z: <https://youtu.be/EaxFrSo0YHM>.
- [13] MAX TEAM DESIGN. *Boeing 737 MAX-10* [online]. Leden 2020 [cit. 2022-03-04]. Dostupné z: <https://www.maxteamdesign.com/wpdm-package/boeing-737-max-10/>.

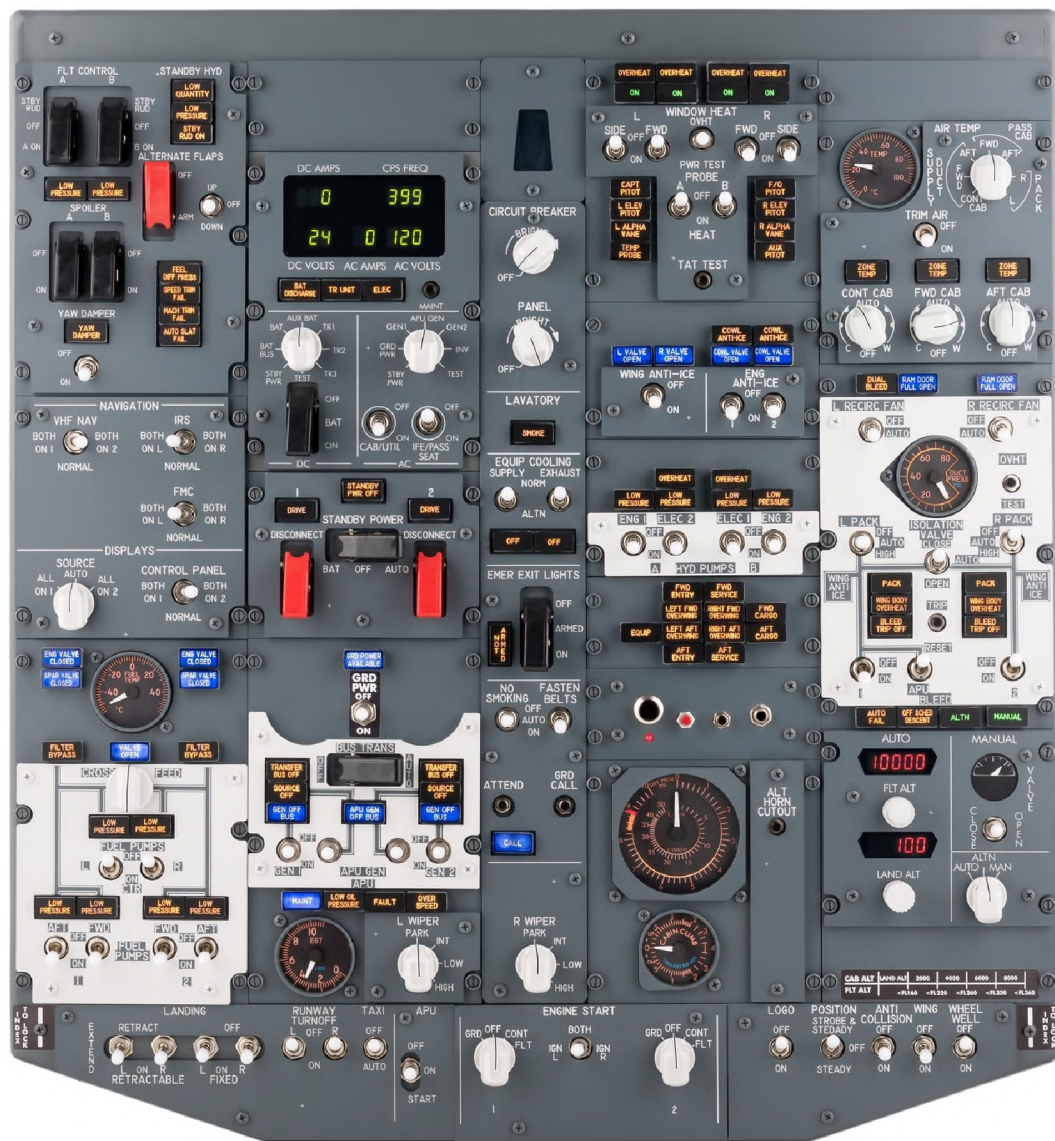
- [14] *Milestones:First Blind Takeoff, Flight and Landing, 1929* [online]. Listopad 2021 [cit. 2022-01-27]. Dostupné z: https://ethw.org/Milestones:First_Blind_Takeoff,_Flight_and_Landing,_1929.
- [15] TECHTERMS. *MVC* [online]. Březen 2018 [cit. 2022-03-04]. Dostupné z: <https://techterms.com/definition/mvc>.
- [16] NAGABHUSHANA, S. *Aircraft Instrumentation and Systems*. I.K. International Publishing House Pvt. Limited, 2013. 21 s. ISBN 9789380578354. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=zwmJI0I3qCMC>.
- [17] NASA. *NASA TLX: TASK LOAD INDEX* [online]. Prosinec 2020 [cit. 2022-04-24]. Dostupné z: <https://humansystems.arc.nasa.gov/groups/tlx/>.
- [18] NASA. *X-Plane Connect* [online]. Prosinec 2021 [cit. 2022-03-04]. Dostupné z: <https://github.com/nasa/XPlaneConnect>.
- [19] ROCKETROUTE. *EAN INTRODUCTION TO ELECTRONIC FLIGHT BAGS* [online]. Zář 2013 [cit. 2022-04-18]. Dostupné z: <https://www.rocketroute.com/blog/electronic-flight-bag>.
- [20] SHIRAHATA, H., ITAGAKI, M., KOUSAKA, F. a ISHIDA, T. *Liquid crystal display panels for commercial airplanes* [online]. 2003. Dostupné z: <https://web-material3.yokogawa.com/1/11333/tabs/rd-tr-r00035-001.pdf>.
- [21] SKYBRARY. *Electronic Flight Instrument System* [online]. ©2022. revidováno 2022.4.18 [cit. 2022-04-18]. Dostupné z: <https://skybrary.aero/articles/electronic-flight-instrument-system>.
- [22] SMITHSONIAN. *Ryan NYP Spirit of St. Louis, Charles A. Lindbergh* [online]. [b.r.]. revidováno 2022.1.26 [cit. 2022-01-26]. Dostupné z: https://www.si.edu/object/nasm_A19280021000.
- [23] THE BOEING 737 TECHNICAL CHANNEL. *737 Ice and rain protection* [online]. Květen 2021. revidováno 2022.4.13 [cit. 2022-04-13]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=82-rGYc0Qos>.
- [24] THUBER, M. *Touchscreens Clean Up Gulfstream Symmetry Flight Deck* [online]. Leden 2015 [cit. 2022-04-28]. Dostupné z: <https://www.ainonline.com/aviation-news/business-aviation/2015-01-02/touchscreens-clean-gulfstream-symmetry-flight-deck>.
- [25] TOOLEY, M. *Aircraft Digital Electronic and Computer Systems, 2nd ed.* Routledge, 2013. 9–12 s. ISBN 9780415828604.
- [26] TYSON, J. a CARMACK, C. *CRT Monitors* [online]. Červen 2000 [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: <https://computer.howstuffworks.com/monitor7.htm>.
- [27] *Pilot the 1903 Flyer* [online]. NOVA, 2003 [cit. 2022-01-26]. Dostupné z: <https://www.pbs.org/wgbh/nova/wright/flye-nf.html#flyer>.
- [28] WYATT, D. *Aircraft Flight Instruments and Guidance Systems: Principles, Operations and Maintenance*. Florence: Routledge, 2015. 200–207 s. ISBN 9780415706834.

- [29] *X-Plane 11* [online]. Únor 2022 [cit. 2022-04-12]. Dostupné z: https://flight.fandom.com/wiki/X-Plane_11.
- [30] LAMINAR RESEARCH. *X-Plane 11 Desktop Manual* [online]. 2021 [cit. 2022-01-24]. Dostupné z: <https://www.x-plane.com/manuals/desktop>.
- [31] *B737 Overhead Panel (Forward)* [online]. [b.r.]. revidováno 2022.4.25 [cit. 2022-04-14]. Dostupné z: <https://cockpitbuilderswebstore.com/product/b737-overhead-panel-forward-plugplay/>.
- [32] BBC. *Ohio mocked over wrong Wright brothers number plates* [online]. Říjen 2021 [cit. 2022-01-26]. Dostupné z: <https://www.bbc.com/news/world-us-canada-59008039>.
- [33] BESNARD, G. *Overhead panel of the Caravelle* [online]. Zář 2006 [cit. 2022-01-26]. Dostupné z: <https://www.jetphotos.com/photo/5844425>.
- [34] *Boeing 787 Dreamliner* [online]. Leden 2022 [cit. 2022-01-26]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Boeing_787_Dreamliner.
- [35] ANGLISANO, L. *Checklist Apps: Limited Utility* [online]. Červenec 2016 [cit. 2022-04-27]. Dostupné z: <https://www.aviationconsumer.com/safety/checklist-apps-limited-utility/>.
- [36] *Consolidated NY* [online]. Květen 1928. revidováno 2021.1.26 [cit. 2022-01-26]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Consolidated_NY#/media/File:Consolidated_NY-2_NACA_1928.jpg.
- [37] *Electronic fly bag* [online]. Březen 2005 [cit. 2022-01-31]. Dostupné z: <https://www.jetphotos.com/photo/459874>.
- [38] FANTASY OF FLIGHT. *1927 Spirit of St. Louis* [online]. ©2022. revidováno 2022.1.26 [cit. 2022-01-26]. Dostupné z: <https://www.fantasyofflight.com/collection/aircraft/currently-not-showing-in-museum/golden-age/1927-spirit-of-st-louis/>.
- [39] *Flight management system* [online]. Leden 2022 [cit. 2022-01-31]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Flight_management_system.
- [40] FLY UK. *Boeing 737 - 700/800 - Normal Checklist* [online]. [b.r.]. revidováno 2022.4.25 [cit. 2022-04-25]. Dostupné z: <https://flyuk.aero/assets/downloads/resources/checklists/UKV-PRD-B737-CHECKLIST-V2.pdf>.
- [41] GRIGG, M. *HUD view* [online]. Srpen 2017 [cit. 2022-01-31]. Dostupné z: <https://twitter.com/MarkGrigg/status/895233262280351744/photo/1>.
- [42] AVIATION WEEK. *Gulfstream Unveils G500 and G600* [online]. Listopad 2014 [cit. 2022-04-28]. Dostupné z: <https://cz.pinterest.com/pin/360147301435607315/>.
- [43] HUBER, M. *Bell Unveils Single-screen V-280 Cockpit* [online]. Květen 2015 [cit. 2022-04-27]. Dostupné z: <https://www.ainonline.com/aviation-news/defense/2015-05-21/bell-unveils-single-screen-v-280-cockpit>.
- [44] HEMMERDINGER, J. *Simulator tests demonstrate 737 Max manual trim difficulties* [online]. Duben 2020 [cit. 2022-04-13]. Dostupné z: <https://www.flightglobal.com/safety/simulator-tests-demonstrate-737-max-manual-trim-difficulties/137651.article>.

- [45] LOTHROP, M. *Plumbers in the Sky: The Demise of Flight Engineer* [online]. Duben 2015 [cit. 2022-01-27]. Dostupné z: http://www.nycaviation.com/2015/04/plumbers-sky-demise-flight-engineer/38613?__cf_chl_tk=UNVs291zC1P39TecSz9cmpc8dX047z9Bq0U6tCLABQU-1651014165-0-gaNycGzNA5E.
- [46] ŠVARC, M. *Smartwings jako první přistály v Antarktidě s Boeingem 737 MAX* [online]. Leden 2022 [cit. 2022-04-13]. Dostupné z: <https://www.novinky.cz/cestovani/clanek/smartwings-jako-prvni-pristaly-v-antarktide-s-boeingem-737-max-40385174>.
- [47] *Sud Aviation Caravelle III* [online]. Srpen 2009 [cit. 2022-03-04]. Dostupné z: https://www.airteamimages.com/sud-aviation-caravelle_SE-DAI_-_90867.html.
- [48] *Testimony of Pilot (11): Cockpits – Situational Awareness in the the Arena* [online]. Květen 2019 [cit. 2022-01-26]. Dostupné z: <http://rememberedsky.com/?p=2833>.
- [49] *WRIGHT PLANS & DRAWINGS* [online]. ©2010. revidováno 2022.1.26 [cit. 2022-01-26]. Dostupné z: https://www.wright-brothers.org/Information_Desk/Help_with_Homework/Wright_Plans/Wright_Plans.htm.

Příloha A

Dokumenty odkazované z textu



Obrázek A.1: Současná podoba overhead panelu Boeingu 737™. Převzato z [31].

PRE FLIGHT CHECKLIST		BEFORE TAKE-OFF CHECKLIST	
DASH	PARKING BRAKE SET	DASH	PARKING BRAKE SET
	BATTERY GUARD CLOSED	FUEL	C FUEL PUMPS AS REQUIRED
	STANDBY POWER GUARD CLOSED		DE-ICE AS REQUIRED
FUEL	L CENTER FUEL PUMP AS REQUIRED		CABIN LIGHTS AS REQUIRED
	L AFT FUEL PUMP AS REQUIRED	DASH	FLIGHT INSTRUMENTS CHECK
ENG	APU START		ENGINE INSTRUMENTS CHECK
ELEC	APU GEN ON	Request Takeoff Clearance	
LIGHT	POS LIGHTS STEADY	LIGHT	LANDING LIGHTS ON
	LOGO LIGHT AS REQUIRED		STROBE LIGHT ON
	CABIN LIGHTS AS REQUIRED		TAXI LIGHTS OFF
	EMER EXIT LIGHTS GUARD CLOSED	AFTER TAKE-OFF CHECKLIST	
DOOR	PASSENGER SIGNS ON	DASH	POSITIVE RATE OF CLIMB GEAR UP
BLEED	PACKS AUTO / HIGH	HYDR	AUTO-BRAKE OFF
Request Flight-plan Clearance		ENG	ENGINE START SWITCHES OFF
NTHCE	WINDOW HEAT ON	LIGHT	RWY TURN-OFF LIGHTS OFF
HYDR	AUTO BRAKE RTO		CABIN LIGHTS AS REQUIRED
DOOR	DOORS CLOSED	CLIMB-OUT CHECKLIST	
BEFORE START CHECKLIST		Passing 10'000 ft	
Request Pushback & Startup Clearance		LIGHT	LANDING LIGHTS OFF
FUEL	L & R C FUEL PUMPS AS REQUIRED	DOOR	FASTEN SEAT BELTS OFF
	A & F FUEL PUMPS ON	FUEL	C FUEL PUMPS AS REQUIRED
HYDR	ELEC HYD PUMPS ON	CRUISE & DESCENT PREPERATION	
LIGHT	ANTI COLL LIGHT ON	DASH	ENGINE & INSTRUMENTS MONITOR
DASH	PARKING BRAKE SET		FUEL QUANTITY CHECK
	GROUND EQUIPMENT REMOVED	LIGHT	LIGHTS AS REQUIRED
	ENGINE AREA CLEAR	Descent	
ENGINE START CHECKLIST		ANTH	DE-ICE AS REQUIRED
BLEED	SEC DISPLAY UNIT ENGINE	HYDR	AUTO BRAKE AS REQUIRED
	PACKS OFF	Below 10'000 ft	
ENG	IGNITION SELECTOR L		SPEED 250 KIAS
	ENGINE 1 START SWITCH GND	LIGHT	LANDING LIGHTS ON
	ENGINE 1 FUEL CONTROL LEVER RUN	DOOR	PASSENGER SIGNS ON
	IGNITION SELECTOR R	Check Weather (ATIS, Flight Services)	
	ENGINE 2 START SWITCH GND	APPROACH CHECKLIST	
	ENGINE 2 FUEL CONTROL LEVER RUN	DASH	FLAPS 15
BEFORE TAXI CHECKLIST			SPEED BRAKE ARM
ELECT	GENERATORS 1 & 2 ON	ENG	2ND AUTOPILOT ARM (when ILS established)
NTHCE	PROBE HEAT ON		ENGINE START SWITCHES CONT
	WING ANTI ICE AS REQUIRED		LANDING FLAPS SET
	ENGINE ANTI ICE AS REQUIRED	LANDING CHECKLIST	
BLEED	PACKS AUTO	LIGHT	RWY TURN-OFF LIGHTS ON
	ISOLATION VALVE AUTO	DASH	LANDING GEAR CHECK DOWN
	APU BLEED OFF	After Touch-Down	
ENG	APU OFF		THRUST REVERSE ENGAGE
	ENG START SWITCHES CONT		AUTOPILOT OFF
DASH	FLAPS AS REQUIRED		AUTOTHURST OFF
Request Taxi Clearance			AT 60 KTS REV THRUST TO IDLE
LIGHTS	TAXI LIGHTS ON		AT 30 KTS AUTO-BRAKE DISENGAGE
	RWY TURN-OFF LIGHTS AS REQUIRED	TAXI CHECKLIST	
TAXI CHECKLIST		TAXI to assigned runway SPEED Max. 20 knots	
		BRKS/GYRO/TURN COORDINATOR.. CHECK during taxi	

Obrázek A.2: Upravený checklist letounu Boeing 737 (část 1/2). Převzato z [40].

AFTER LANDING CHECKLIST	
DASH	FLAPS RETRACT
	SPEED BRAKE DOWN
LIGHT	LANDING LIGHTS OFF
	STROBE LIGHTS OFF
	TAXI LIGHTS ON
	CABIN LIGHTS AS REQUIRED
ANTH	ANTI ICE AS REQUIRED
ENG	APU START / CHECK RUN
ANTH	PROBE HEAT OFF
ENG	ENG START SWITCHES OFF
HYDR	AUTO-BRAKE OFF
<i>Taxi to Assigned Gate/Parking (Speed Max 20 knots)</i>	
LIGHT	RWY TURNOFF LIGHTS OFF
ELECT	APU GEN ON / CHECK VOLTS
<i>Turning Into The Gate:</i>	
LIGHT	TAXI LIGHTS OFF
PARKING / SHUTDOWN CHECKLIST	
DASH	PARKING BRAKES SET
	ENGINE FUEL CONTROL LEVERS OFF
	GROUND CONTACT ESTABLISH
	GROUND OPERATIONS AS REQUIRED (FMC)
DOOR	PASSENGER SIGNS OFF
BLEED	APU BLEED AIR ON
LIGHTS	ANIT COLL LIGHT OFF
FUEL	FUELPUMPS OFF
	L AFT FUEL PUMP ON
ANTH	ANTI-ICE OFF
HYD	ELEC HYD PUMPS OFF
BLEED	ISOLATION VALVE OPEN
ELECT	ELECTRICAL POWER ESTABLISH
LIGHTS	EXTERIOR LIGHTS AS REQUIRED
DOOR	DOORS OPEN
>> SKYTRACK – PIREP FILED ! <<	
SECURING AIRCRAFT	
ENG	APU OFF
FUEL	L AFT FUEL PUMP OFF
LIGHT	EMERGENCY EXIT LIGHTS OFF
ANTH	WINDOW HEAT OFF
BLEED	PACKS OFF
	CABIN LIGHTS OFF
LIGHT	EXTERIOR LIGHTS OFF
	STANDBY POWER OFF
	BATTERY OFF

Obrázek A.3: Upravený checklist letounu Boeing 737 (část 2/2). Převzato z [40].

Příloha B

Paměťové médium

Příložené paměťové médium obsahuje zdrojové kódy rozhraní, využívané obrázky rozhraní, upravenou verzi knihovny X-Plane connect a zdrojové kódy práce pro vytvoření PDF dokumentu.