
Recenzovaný článek

Testování schopností pilotů na leteckých simulátorech

Testing of Pilots Abilities on Flight Simulators

Rudolf Jalovecký

Abstrakt:

Článek představuje více jak desetileté zkušenosti z testování schopností pilotů při řízení letu na leteckých simulátorech. Je vyřčená hypotéza o možnostech nalezení společných rysů při řízení letu, uveden základní matematický aparát pro vyhodnocení, představeny využívané letecké simulátory a samozřejmě i dosažené výsledky. Otestováno již bylo 110 pilotů a celkem simulováno 2360 misí – testovacích letů. Následná matematická analýza poskytla na cca 40 tisíc výsledků vhodných pro další statistické zpracování. Toto množství získaných dat z reálně simulovaných letů dává předpoklad pro definování použitelných závěrů k navrženým hypotékám. Pro potřeby následné certifikace byl rovněž připraven návrh metodiky měření pilotů, která shrnuje jak teoretický přístup k testování pilotů, tak i postup realizace testů na jednotlivých simulátorech. Součástí návrhu metodiky je uveden i přehled vytvořeného programového vybavení jak pro usnadnění evidence dat z jednotlivých misí, tak i programového vybavení pro vlastní analýzy naměřených dat z misí.

Abstract:

The article presents more than ten years of experience in testing the abilities of pilots during flight control on flight simulators. A hypothesis is stated about the possibilities of finding common features in flight control, the basic mathematical apparatus for evaluation is presented, the flight simulators used and, of course, the achieved results are presented. 110 pilots have already been tested and a total of 2360 missions - test flights - have been simulated. Subsequent mathematical analysis provided approximately 40,000 results suitable for further statistical processing. This amount of data obtained from realistically simulated flights provides a prerequisite for defining applicable conclusions to the proposed mortgages. For the needs of subsequent certification, a proposal for the pile measurement methodology was also prepared, which summarizes both the theoretical approach to pile testing and the procedure for carrying out tests on individual simulators.

Klíčová slova: Letecký simulátor; lidský faktor; model chování člověka; testování pilotů.

Keywords: Flight Simulator; Human Factor; Human Behavior Model; Pilot Testing.

ÚVOD

Současný letecký provoz klade značné nároky na schopnosti, tedy výcvik pilotů. Z ekonomického a bezesporu i z bezpečnostního hlediska se část výcviku odehrává na leteckých simulátorech různých stupňů dokonalosti. Řada firem nabízí různě dokonalé letecké simulátory, ale vesměs zaměřené jen na běžný výcvik a jejich další využití ve prospěch navrhovaných testů je minimální.

Kvalita výcviku pilotů je dána i schopnostmi spolehlivě a v krátkém čase reagovat na změnu standardních letových parametrů. Tento text obsahuje teorii chování pilotů při řízení letu, matematické postupů včetně způsobů vyhodnocení výsledků a možnosti testování pilotů právě na vznik nečekané změny letových parametrů. Na těchto základech pak vznik návrh metodiky testování pilotů s cílem ukázat možnosti definování stavu vycvičenosti konkrétního pilota.

1 HYPOTÉZA PRO TESTOVÁNÍ CHOVÁNÍ PILOTŮ

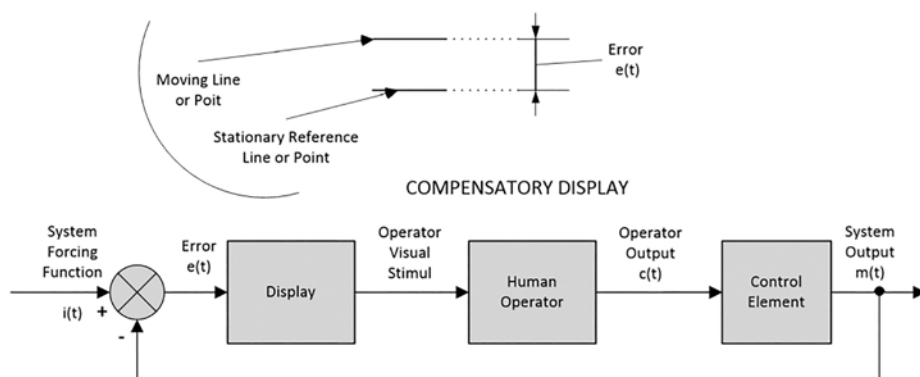
Všeobecně se ví, že čím déle děláme určitou činnost, tím se v ní zlepšujeme. Příkladem může být řízení vozidla. Řidič získává návyky v řízení auta a s dobou se v řízení zdokonaluje, začíná předpokládat nejbližší situace (před křižovatkou, při předjíždění, před přechodem pro chodce apod.), časem začíná ovládat auto podvědomě a více se věnuje vnějším - především vizuálním situacím před a případně i kolem vozidla. Podobně můžeme uvažovat o pilotovi, co řídí let letounu. S dobou výcviku se jeho schopnosti spolehlivě a bezpečně řídit letadlo zvyšují. Naskytá se tu jistá možnost pokusit se stav jeho schopností řídit letadlo vhodně a objektivně měřit, testovat či hodnotit. Můžeme tedy vyřknout hypotézy:

1. Lze vyhledat společné rysy v chování pilotů při řízení letu letounu s využitím leteckých simulátorů.
2. Je možné k objektivnímu hodnocení využít dostupný matematický aparát a statisticky vyhodnocovat výsledky testů.
3. Lze porovnáním reakcí na podnět u mladých, méně vycvičených pilotů s piloty, kteří mají za sebou 400 - 500 či ještě více odlétaných hodin na skutečných letounech, nikoliv jen simulátorech, naznačit možnosti využití použitých testů ke stanovení vycvičenosti pilotů.

Dlouhodobé testování začínajících i těch zkušenějších pilotů probíhá na Katedře letecké techniky Univerzity obrany již řadu let, přesněji od roku 2013 a přináší použitelné výsledky v odhadech stupně vycvičenosti jednotlivců.

2 MOŽNÝ MATEMATICKÝ POPIS CHOVÁNÍ PILOTA

Pro alespoň objektivní hodnocení schopností pilotů a jejich chování se historicky zabývala řada vědců. Sledováním možného matematického popisu chování člověka na vnější podnět se historicky zabýval vědec Mc. Reuer a jeho kolegové cca v 80-tých letech minulého století. Tento autor dal základ pozdějším vědcům, kteří se následně problematikou možného popisu chování člověka budou zabývat. Jeho dvě (mimočodem dosti podobná, ale ne úplně stejná díla) jsou dostupná v PDF kopiích strojopisů ^{1,2}. Mc. Reuer zde poprvé popsal vazby mezi strojem a člověkem – lidským operátorem (viz obrázek č. 1).



Obrázek č. 1: Základní blokové schéma ručního řízení stroje³

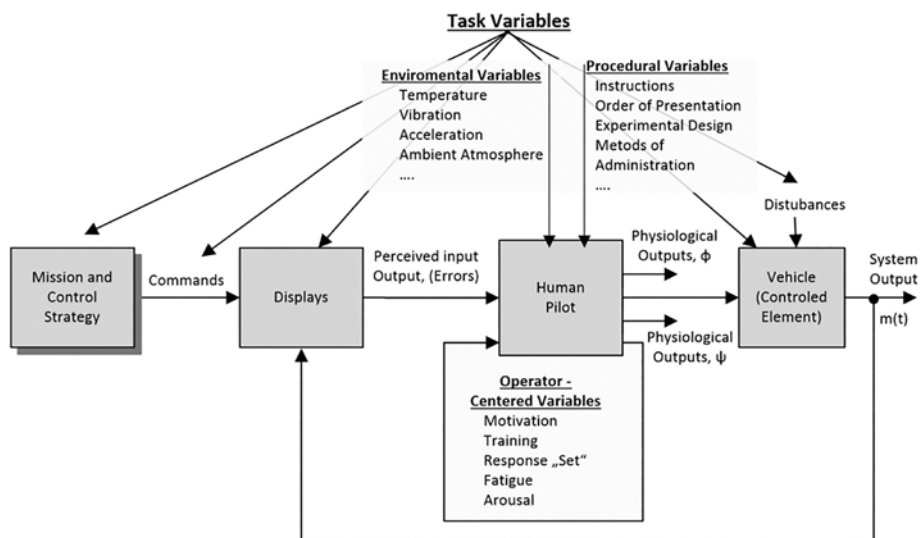
Ve svých dílech Mc. Reuer rozebírá elementární přenosové prvky, již z hlediska prvků teorie automatické regulace. Současně se ovšem věnuje i problematice člověka, jeho vnitřním pochodům při vzniku podnětu ať již optického, zvukového nebo pohybového. Komplexně je rozděluje do čtyř kategorií a uvádí je v přehledném diagramu – viz obrázek č.2.

- Task Variables - Proměnné úlohy, které zahrnují všechny systémové vstupy a ovládání systémových prvků vně pilota.
- Environmental Variables – Životní prostředí – okolí – vně pilota, nezávislé na pilotovi.
- Procedural Variables – Procesy realizující přípravu pilota.
- Operator - Centered Variables – Centrální operátor – pilot, zajišťuje bezprostřední řízení stroje.

¹ D. T. McRuer, E. S. Krendel, „Mathematical Models of Human Pilot Behavior“, AGARD AG-188, 1974. [on-line též na <https://user.unob.cz/jalovecky/HMI/>]

² McRuer, Duane, Mathematical Models of Human Pilot Behavior [on-line též na <https://user.unob.cz/jalovecky/HMI/>]

³ D. T. McRuer, E. S. Krendel, „Mathematical Models of Human Pilot Behavior“, AGARD AG-188, 1974. [on-line též na <https://user.unob.cz/jalovecky/HMI/>]



Obrázek č. 2: Přehledový diagram – veličiny co ovlivňují chování pilota⁴

Tímto členěním dal Mc. Reuer základ budoucího vzniku tzv. SHELL modelu ^{5,6,7,8} (viz obrázek č. 3.), který popisuje veškeré vazby mezi operátorem a okolím. Autor šel i výrazně dál a matematicky popsal možné chování člověka v tzv. uzavřené regulační smyčce viz obrázek č. 4., který lze chápat jako náznak kompenzačního řízení se zařazením lidského operátora. Z celého jeho díla o rozsahu přes 90 stran lze i dnes získávat nové a nové informace.

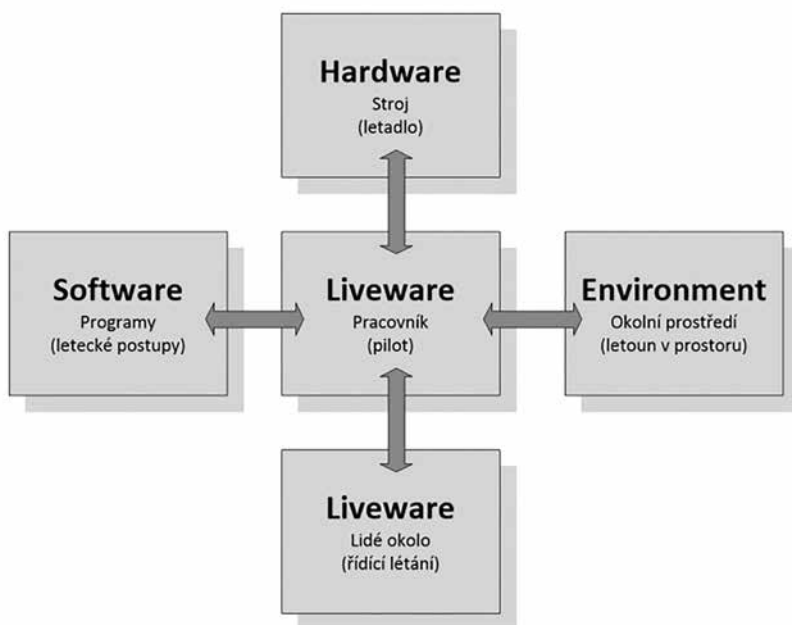
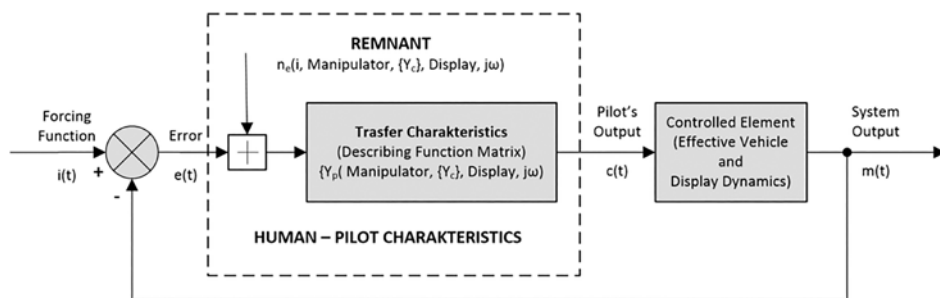
⁴ D. T. McRuer, E. S. Krendel, „Mathematical Models of Human Pilot Behavior“, AGARD AG-188, 1974. . [on-line též na <https://user.unob.cz/jalovecky/HMI/>]

⁵ Shell Model in Aviation, [on-line 5. 1. 2023], www.aviationfile.com/shell-model-aviation/

⁶ ICAO SHELL Model, [on-line 5. 1. 2023], <https://www.skybrary.aero/articles/icao-shell-model>

⁷ T. T. Wong, S. Tong, An airworthiness SHELL model for aircraft maintenance, [on-line 30. 5. 2023], <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6837952>

⁸ AviationKnowledge, Human factors models (in aviation), [on-line 5. 1. 2023] <http://aviationknowledge.wikidot.com/aviation:human-factors-models>

Obrázek č. 3: SHELL model⁹Obrázek č. 4: Blokové schéma kvazi-lineárního modelu pilota při řízení letu¹⁰

⁹ Shell Model in Aviation, [on-line 5. 1. 2023], www.aviationfile.com/shell-model-aviation/

¹⁰ D. T. McRuer, E. S. Krendel, „Mathematical Models of Human Pilot Behavior“, AGARD AG-188, 1974. [on-line též na <https://user.unob.cz/jalovecky/HMI/>]

2.1 Matematický základ pro analýzu chování pilotů

Pro pochopení předchozích schémat a pro další teorii v tomto článku si drobně objasníme základní pojmy a prvky z teorie automatického řízení. Základem všeho je sledování změn výstupní veličiny na základě změny vstupní veličiny. Matematickým popisem tomu říkáme přenos a předpokládáme u něj dynamické změny (časově proměnné hodnoty na vstupu a následně pak i na výstupu). V podstatě nám jde o popis tzv. „Black box“ (viz obrázek č. 5.) s cílem objasnit vlastnosti toho bloku – obecněji řídicího systému. Na počátku o něm prakticky nic nevíme. Jde nám především o zjištění, jak vstupní veličiny změní a pošle na výstupy. Tento popis nazveme „dynamické vlastnosti systému“.



Obrázek č. 5: Blokové schéma

Dynamické vlastnosti systému můžeme popsat pomocí diferenciální rovnice n -tého řádu vyjadřující vztah mezi vstupní a výstupní veličinou soustavy. Diferenciální rovnice popisující lineární soustavu v obecném tvaru jsou poměrně složité a není příliš přehledné a jednoduché s nimi pracovat. Daleko lépe se použije tzv. Laplaceův obraz vstupní a výstupní veličiny. Laplaceovou transformací^{11,12} jsme tedy diferenciální rovnici převedli na polynomiální algebraickou rovnici, s kterou se podstatně lépe pracuje. Současně je to první krok řešení diferenciálních rovnic pomocí Laplaceovy transformace. Pokud budeme potřebovat získat zpět originál (časově proměnnou výstupní veličinu), použijeme tzv. zpětnou Laplaceovu transformaci.

Mezi nejjednodušší přenosové prvky patří:

- Lineární člen – lineárně zesiluje nebo zeslabuje vstupní signál.
- Integrovaný člen – integruje vstupní signál podle průběžného času, tzn., že výstupní signál s časem roste nebo klesá, podle znaménka polarity.

Derivační člen – derivuje vstupní signál podle průběžného času, tzn., že výstupní signál je úměrný derivaci vstupního signálu podle času (plocha pod křivkou).

¹¹ Laplaceova transformace, [on-line 5.1.2024], <https://matematika.cuni.cz/dl/analyza/28-lap/lekce28-lap-dmin.pdf>

¹² Laplaceova transformace, [on-line 5.1.2023], <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/940>

- Setrvačný člen – nejrozšířenější dynamický člen – v nejjednodušším případě kmitavý člen neboli setrvačný člen 2. řádu. Jde o člen, který obsahuje dvě energetické kapacity a definujeme u nich velikost tlumení, tedy vlastnost, kdy kmitání (po předchozím vybuzení) přestane – je utlumeno s vlastní frekvencí těchto kmitů.

2.2 Matematický popis chování pilota při řízení letu letounu¹³

Mc. Reuer se se svým kolektivem pokusili o matematický popis chování člověka právě s využitím prvků automatické regulace. I v současné době jej lze považovat za základní matematický model dynamických vlastností pilota – tedy matematický popis jeho chování.

$F_{(s)} = \frac{Y_{(s)}}{X_{(s)}} = K \frac{(T_3 s + 1)}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} e^{-\tau s}$	(1) „A“
--	--------------

kde:

K	- přírůstek síly na kormidlech ve vztahu k jejich odchylce (1 až 100)
T ₁	- integrační časová konstanta, tj. schopnost pilota realizovat proměnné činnosti (0,2 až 1s)
T ₂	- dynamické vlastnosti výkonových členů pilota (0,1 až 2s) - neuromuskulární časová konstanta
T ₃	- reakční časová konstanta, tj. schopnost reagovat na rychlost změny vstupního signálu (5 až 20s) - prediktivní časová konstanta
τ	- dopravní zpoždění (0,1 až 0,4s) - reakční doba pilota
s	- Laplaceův operátor

Současná literatura se v této oblasti věnuje především analýze modelů chování člověka při řízení vozidla. Ke úspěšným výsledkům dospěla disertační práce¹⁴, kde autorka poměrně dobře rozpracovala dynamické chování lidského operátora. Autorka rozpracovává uvedený model chování člověka (1) a aplikuje jej na model řízení vozidla, včetně možného

¹³ Uvedeno též v: Jalovecký, R., Návrh metodiky testování pilotů, Univerzita obrany, Fakulta vojenských technologií, Katedra letecké techniky, 2019, Brno

¹⁴ Havlíková M., Diagnostic Of Systems with a Human Operator, Doctoral Thesis, Brno University of Technology, 2008, 153 p.

chování takto vzniklé soustavy. Ve smyslu Mc. Reuer uvažuje a prakticky simulací i ověřuje zjednodušené modely chování člověka vypuštěním některých časových konstant. Na ní pak úspěšně navázaly disertační práce^{15,16}, které se již zabývaly tematikou modelování chování pilota při řízení letu s využitím leteckých simulátorů. Testovací lety na simulátoru mají velkou výhodu v jednoznačné opakovatelnosti testu. Samozřejmostí pak je vysoká bezpečnost těchto testů a minimální náklady na tyto testy.

Vypuštěním integrační časové konstanty T_1 dostaneme zjednodušenou přenosovou funkci, často označovanou jako Grossův model dynamiky člověka^{17,18}:

$F_{(s)} = \frac{Y_{(s)}}{X_{(s)}} = K \frac{(T_3 s + 1)}{(T_2 s + 1)} e^{-\tau s}$	(2) „B“
---	------------

Mezi ty nejjednodušší způsoby činnosti člověka – pilota patří procesy, kdy člověk neprovádí žádné „integrace“ či „derivative“ vstupního signálu a vykonává „jen“ funkci zesilovacího členu s dynamikou výkonového členu. Tím získáme nejjednodušší přenosovou funkci dynamiky člověka – pilota^{17,18} jen s použitím neuromuskulární časové konstanty T_2 :

$F_{(s)} = \frac{Y_{(s)}}{X_{(s)}} = K \frac{1}{(T_2 s + 1)} e^{-\tau s}$	(3) „C“
---	------------

Přílišné zjednodušování modelů chování pilotů při řízení letu se v praxi ukázalo málo použitelné, naopak další rešerš dostupné literatury se ukazuje potřeba naopak zvyšovat počty časových konstant v matematických modelech chování pilotů. Autor tohoto článku maximálně tyto informace využívá ve prospěch dalších analýz chování člověka při řízení letu (všechna získaná a využitelná literatura, včetně publikací autora jsou k dispozici na <https://user.unob.cz/jalovecky/HMI/>).

Matematickými analýzami v disertační práci¹⁹ bylo zjištěno, že pro přesnější vyhodnocení chování člověka při řízení letu letounu by bylo vhodné rozšířit rovnici (1) o další časové konstanty (T_4 a T_5). Získáme tak přenosovou funkci vyššího řádu a při aplikaci vhodných identifikačních metod pro určení parametrů navržené přenosové funkce dostaneme i lepší výsledky. Fyziologické případně psychologické děje, které by bylo možné těmito časovými konstantami interpretovat, jsou prozatím součástí dalšího výzkumu.

¹⁵ Bořil J., Analýza mechatronické soustavy pilot - letadlo - autopilot z hlediska systémů automatického řízení letu, disertační práce, Univerzita obrany, Brno, 2005

¹⁶ Jirgl, M. Analýza modelů chování pilota při řízení letu letounu, disertační práce Vysoké učení technické v Brně, Brno, 2016. 142 s.

¹⁷ Gross, J. J. (201) Emotion regulation: Conceptual and empirical foundations. In J. J. Gross (Ed.), Handbook of emotion regulation (pp. 3–20). 2014, The Guilford Press.

¹⁸ Gross J.J., Emotion regulation: current status and future prospects. Psychol Inq, 26 (2015), pp. 1-26

¹⁹ Jirgl, M. Analýza modelů chování pilota při řízení letu letounu, disertační práce Vysoké učení technické v Brně, Brno, 2016. 142 s.

Dále ale předpokládat, že půjde o svaly, které v určitém okamžiku strnulosti se mohou rozkmitat, vibrovat s nějakou frekvencí.

$F_{(s)} = \frac{Y_{(s)}}{X_{(s)}} = K \frac{(T_3 s + 1)(T_5 s + 1)}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)(T_4 s + 1)} e^{-\tau s}$	(4) „D“
--	--------------------------

Variací časových konstant T_4 a T_5 získáme další modifikace matematického modelu chování člověka při řízení letu.

$F_{(s)} = \frac{Y_{(s)}}{X_{(s)}} = K \frac{(T_3 s + 1)(T_5 s + 1)}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} e^{-\tau s}$	(5) „E“
$F_{(s)} = \frac{Y_{(s)}}{X_{(s)}} = K \frac{(T_3 s + 1)}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)(T_4 s + 1)} e^{-\tau s}$	(6) „F“

Všechny uvedené rovnice (1) až (6) zdaleka nepokrývají další možnosti tvorby přenosových funkcí modelu chování člověka. Jde o další možnosti zvyšování řádů přenosových funkcí. Potřebná fyziologická interpretace v lidském těle zatím chybí, přestože i Mc. Ru-er ve své práci^{20,21} zmiňuje možné vyšší řády přenosových funkcí, ale prezentuje je jako tlumené kmity svalů. Pro přehlednost matematických modelů je autor i v návrhu Metodiky označuje písmeny „A“ až „F“, což je současně uvedeno v odkazech rovnic.

3 ZPŮSOB MĚŘENÍ A MOŽNOSTI TESTOVÁNÍ REAKCÍ PILOTŮ²²

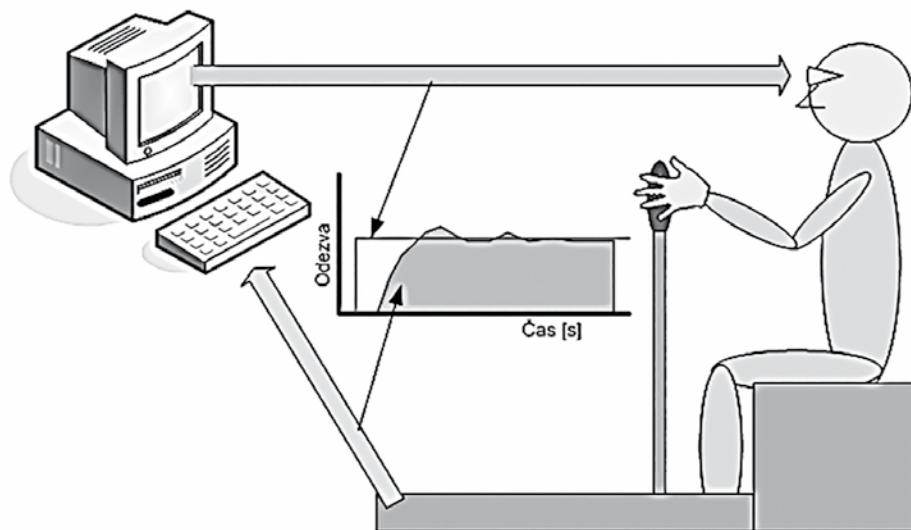
Matematickou analýzou získaných dat z experimentálních měření reakcí člověka na podnět v procesu řízení letu letounu lze získat parametry modelů chování člověka. Parametry modelů jsou definovány rovnicemi (1) až (6). Testovaný pilot sleduje na obrazovce či palubních přístrojích simulátoru skokovou změnu výšky a snaží se výchylkou řídicí páky

²⁰ D. T. McRuer, E. S. Krendel, „Mathematical Models of Human Pilot Behavior“, AGARD AG-188, 1974. [on-line též na <https://user.unob.cz/jalovecky/HMI/>]

²¹ McRuer, Duane, Mathematical Models of Human Pilot Behavior, [on-line též na <https://user.unob.cz/jalovecky/HMI/>]

²² Uvedeno též v: Jalovecký, R., Návrh metodiky testování pilotů, Univerzita obrany, Fakulta vojenských technologií, Katedra letecké techniky, 2019, Brno

dosáhnout původní výšky letu. Principiálně lze tento způsob přiblížit na obrázku č. 6. Vzorkovaný časový průběh pohybu řídicí páky je přenesen do počítače a zaznamenáván spolu s velikostí vnějšího podnětu. Oba tyto údaje spolu s časovou osou se pak použijí v matematických metodách experimentální identifikace.



Obrázek č. 6: Princip měření odezvy člověka na vizuální podnět²³

K určení jednotlivých číselných hodnot časových konstant uvedených přenosových funkcí všech modelů chování pilota se používá řada matematických metod experimentální identifikace reálných systémů. Řad z nich je integrována do simulačního prostředí MATLAB[®] ²⁴, ať již v podobě iterační funkce `fminsearch`, která hledá minimum vícerozměrné funkce, či přímé použití knihovny „System Identification Toolbox“ ²⁵. Tato knihovna obsahuje celou řadu nástrojů právě na výpočty odhadů dynamiky nelineárního systému.

Úspěšnost těchto metod dokumentují již nejen uvedené disertační práce ^{26,27,28}, ale i celá řada dalších publikovaných článků jak autorem, tak i jeho doktorandy či diplomanty.

²³ tamtéž

²⁴ MATLAB, SIMULINK, Handle Graphics a Real-Time Workshop jsou registrované známky firmy The MathWorks, Inc., 3 Apple Hill Drive, Natick MA 01760-1500, USA

²⁵ System Identification Toolbox, Create linear and nonlinear dynamic system models from input-output data <https://nl.mathworks.com/products/sysid.html>

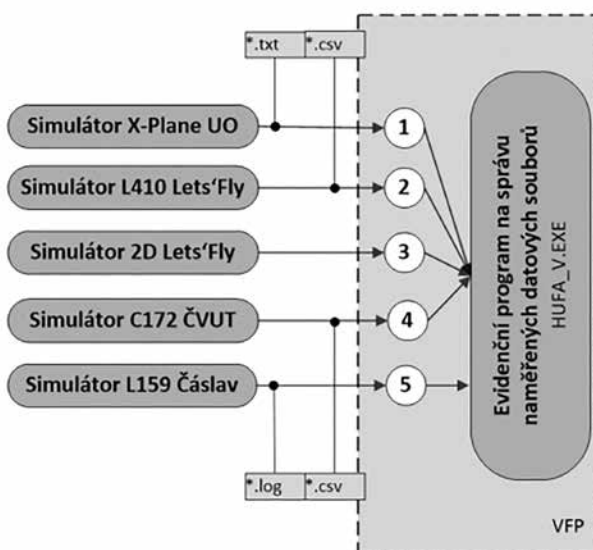
²⁶ Havlíková M., Diagnostic Of Systems with a Human Operator, Doctoral Thesis, Brno University of Technology, 2008, 153 p.

²⁷ Bořil J., Analýza mechatronické soustavy pilot - letadlo - autopilot z hlediska systémů automatického řízení letu, disertační práce, Univerzita obrany, Brno, 2005

²⁸ Jirgl, M. Analýza modelů chování pilota při řízení letu letounu, disertační práce Vysoké učení technické v Brně, Brno, 2016. 142 s.

4 CHARAKTERISTIKA POUŽITÝCH LETECKÝCH SIMULÁTORŮ

V průběhu řešení problematiky testování pilotů a následné vyhodnocení jejich reakcí se postupně využilo 5 leteckých simulátorů. Na obrázku č. 7. je uveden náhled na možnosti vytvořeného programu HUFA_V²⁹. Základem veškerého testování a vyhodnocování reakcí pilotů byl a je letecký simulátor postavený na platformě Windows X-Plane-10. Díky získání projektu TAČR³⁰ bylo možné využít dva simulátory – L410 a 2D simulátoru ve firmě Lets'Fly. Spolupráci s kolegy z ČVUT pak byl využíván simulátor C172 postavený na pohyblivé základně. Těsně před Covidem se podařilo ve spolupráci s firmou VRGroup³¹ využívat simulátor L159 postavený na letecké základně v Čáslavi s následnou možností testovat piloty v průběhu jejich běžné praxe.



Obrázek č. 7: Náhled na možnosti zpracování vstupních dat z různých leteckých simulátorů³²

Analýzou možných způsobů vyhodnocování naměřených údajů byl zaveden systém pravidelných testů budoucích pilotů vždy před a po jejich leteckém výcviku. V současnosti

²⁹ Jalovecký R. HUFA_V.EXE - Programové vybavení pro evidenci všech pilotů, jejich misí a výsledků analýz, včetně grafických výstupů. Autorský program, Brno, 2012

³⁰ TA04031376 Výzkum/vývoj metodiky výcviku leteckých specialistů L410 UVP - E20, <https://starfos.tacr.cz/cs/projekty/TA04031376>

³¹ VR Group, Tiskařská 270/8, Praha 10, 108 00, pobočka Brno, Šumavská 15,

³² Uvedeno též v: Jalovecký, R., Návrh metodiky testování pilotů, Univerzita obrany, Fakulta vojenských technologií, Katedra letecké techniky, 2019, Brno

se testují již studenti od druhé ročníku studia, tedy studenti, kteří nemusí mít (a z cca 50% nemají) žádnou zkušenost s létáním. Je určitě velmi příjemné, když jsou na studium vojenského pilota přijati studenti, kteří již mají bohatší zkušenosti s létáním, případně již dokonce mají průkaz PPL.

Druhou skupinou testovaných pilotů jsou pak již „řadoví“ piloti, kteří již létají na letounu L159 a jejich testy probíhají na leteckém simulátoru KTL159 umístěném na letecké základně v Čáslavi. V několika sériích měření se povedlo otestovat 10 pilotů celkem v 18 misích, vždy po 10 „skocích“ výšky. Plánování těchto testů komplikuje poměrně vysoká zaneprázdněnost pilotů na základně.

4.1 Letecký simulátor na bázi X-Plane-10

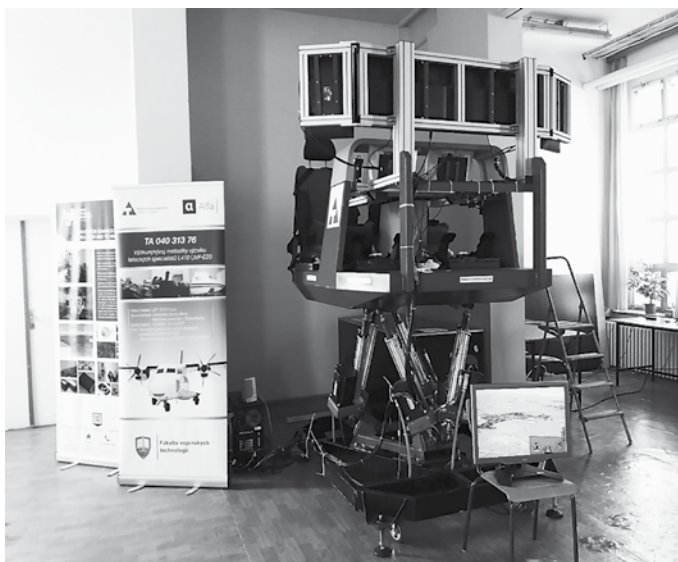
Katedra letecké techniky na Univerzitě obrany v Brně vybudovala v roce 2012 letecký simulátor (viz obrázek č. 8), který je postavený na platformě leteckého simulátoru X-Plane-10. Obsahuje pracoviště testovaného pilota a pracoviště instruktora. Základní programové vybavení obou PC je operační systém Windows 7. Programové vybavení leteckého simulátoru je postaveno na X-Plane 10 GLOBAL + World Wide Global Scenery. Jde o plnou funkční verzi X-Plane v originální verzi doprovázenou též kompletním českým manuálem. Scenérie obsahuje celý svět, včetně reálné celosvětové databáze Jeppesen. Součástí je vysoce podrobná i Česká republika - včetně všech letišť (řízených i neřízených). Software je opatřen řadou samostatných «plug-inů» umožňujících okamžitě připojit celou řadu hardwarových periférií - od certifikovaných výrobců ovladačů v podobě beranů, pedálů, plynových kvadrantů až po pohyblivé platformy. Z hlediska možného programového vybavení pro automatické řízení testů lze vhodně využít programovací prostředí MATLAB® a celý pohyb simulátoru zřídít z vytvořeného programu. Tím pak odpadá nutnost používání instruktorské stanice.



Obrázek č. 8: Pohled na letecký simulátor na katedře letecké techniky Univerzity obrany

4.2 Letecký simulátor na bázi FlightGear

Dvoumístný letecký simulátor na ČVUT (viz obrázek č. 9.) patří do skupiny pohyblivých simulátorů, využívající k pohybu plošiny tzv. Stewardovu základnu. Pohyb plošiny zajišťuje 6 lineárních elektromotorů, které zajišťují pohyb kabiny simulátoru prakticky ve všech třech osách a to jak rotační tak i translační. Z hlediska konstrukce jsou samozřejmě některé pohyby značně omezeny. Přesto lze se simulátorem dobře navodit pohyb jako při skutečném letu. Na displejích před piloty jsou zobrazeny letové údaje, na dvou velkých a dvou malých displejích se zobrazují vizuální situace letu. Ovládání simulátoru je ve velké míře totožné jako u reálných letounů. Využívá se joysticku pro řízení pohybu letounu v prostoru a páky ovládání motoru ke změnám tahu a výkonu motoru. Ovládací prvky simulátoru jsou vytvořeny na bázi koncepce HOTAS (Hands On Throttle-And-Stick). Z hlediska možného programového vybavení pro automatické řízení testů lze i zde využít programovací prostředí MATLAB® a celý pohyb simulátoru řídit z vytvořeného programu.



Obrázek č. 9: Pohled na letecký simulátor ČVUT zapůjčený Univerzitě obrany

4.3 Profesionální letecký simulátor KTL159

Profesionální letecký simulátor letounu L159 – KTL159 (viz obrázek č. 10.), který je umístěn na letecké základně v Čáslavi bezprostředně neumožňuje realizovat testy pilotů při jejich výcviku. Není možné ani realizovat testy vhodným doplněním programového vybavení, jak je tomu u dvou výše popsaných simulátorů. Je to dáno tím, že celý simulátor pracuje v uzavřeném prostředí operačního systému UNIX a není to otevřený systém. Díky spolupráci a ochotě firmy VRGroup bylo možné získat požadované letové údaje

v potřebném formátu pro další zpracování dat. Testy pilotů, resp. řízení skoků výšky je provozováno ručním zásahem do letu z instruktorské stanice (viz obrázek č. 11.) formou tzv. Teleportu.



Obrázek č. 10: Pohled na letecký simulátor KTL159



Obrázek č. 11: Pohled na pracoviště instruktora – na levém monitoru sleduje let a ovládá testy

5 EVIDENCE TESTOVANÝCH PILOTŮ A NAMĚŘENÝCH DATOVÝCH INFORMACÍ

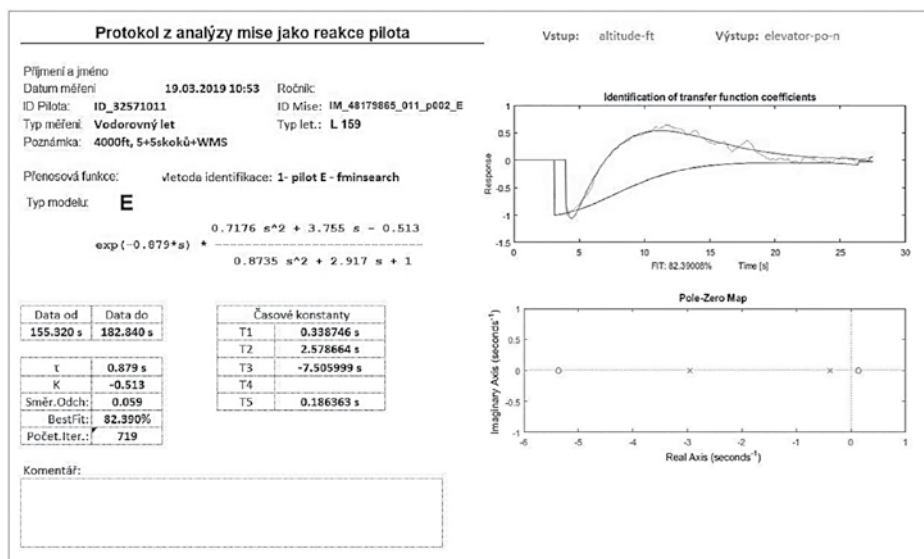
Pro přehledné a současně „anonymizované“ výsledky ve vztahu ke konkrétnímu testovanému pilotovi byl realizován evidenční program, který přiděluje jak pilotovi, tak i každé misi konkrétní číselný identifikátor. Tak není možné přímo z datových souborů určit konkrétního pilota a jeho chování při řízení letu. To umožňuje zveřejňovat dosažené výsledky zcela veřejně a přitom zachovat podmínky ochrany osobních údajů (GDPR). V průběhu testovaného letu se ukládá celá řada letových parametrů do datového souboru s frekvencí 20Hz až 50 Hz podle typu simulátoru. K těmto údajům se synchronně ukládá i reakce pilota, tedy řízení simulovaného letu, především pohyb řídicí páky. Získaný datový soubor je pak evidován v evidenčním programu tak, aby jej bylo možné vždy jednoznačně přiřadit jak k testovanému pilotovi, tak i k realizované misi.

Pro výpočty časových konstant uvedených v rovnicích (1) až (6) bylo nutné vytvořit několik samostatných programových děl v simulačním prostředí MATLAB®. Ten je především určen pro simulační technologie, ale velice pohodlně a hlavně rychle zvládne i iterační metody výpočtu časových koeficientů. Vstupem pro iterační metody výpočtu využívá datový soubor z realizované mise. Ve spolupráci s evidenčním programem je pak přiřadí ke správnému pilotovi a misi.

Ke konci roku 2023 již bylo otestováno přes 110 pilotů a vyhodnoceno kolem 45 tisíc analýz. Řada z testovaných pilotů, tedy především studentů – pilotů, i 3x za dobu studia. Kapitola 2.2 představila matematický aparát pro vyhodnocení reakcí – chování pilota v průběhu letu. Právě vícenásobným a dlouhodobým testováním lze získat věrohodné výsledky a to jak pro konkrétního pilota (tedy v průběhu výcviku) tak i možnosti statistického zpracování vypočtených časových konstant přenosových funkcí a to vždy pro konkrétní simulátor a konkrétní matematický model chování pilota. Autor se svými doktorandy tyto výsledky publikoval v několika článcích, z nich lze zdůraznit^{33,34}.

³³ Jalovecky, R., Tools for Analysing Measured Data of Human Behaviour While Flying an Aircraft, In Modern Safety Technologies in Transportation, 2015, Košice, Slovenská republika

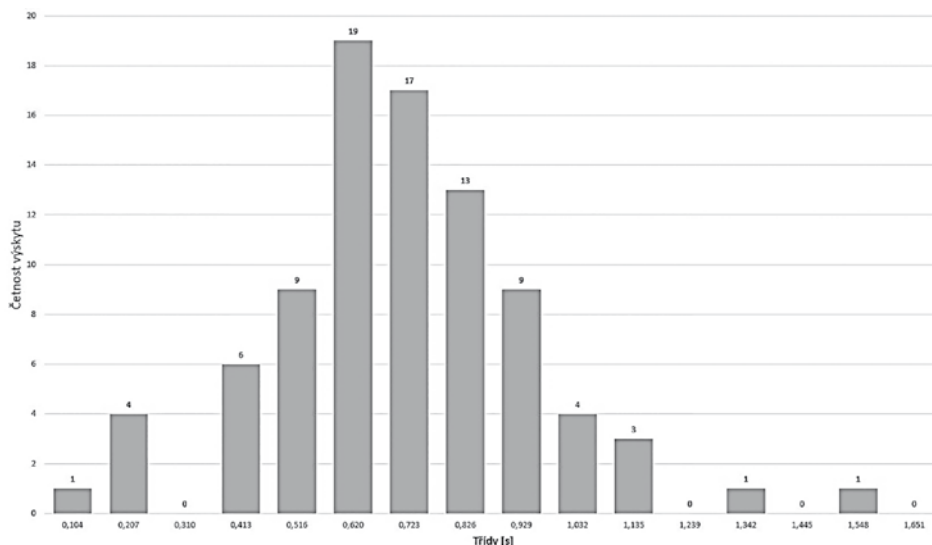
³⁴ Jirgl, M., Boril, J., Jalovecky, R. The Identification Possibilities of the Measured Parameters of an Aircraft Model and Pilot Behavior Model on the Flight Simulator. In International Conference on Military Technologies (ICMT 2015), Brno, 2015



Obrázek č. 12: Příklad generovaného protokolu z testů (jméno pilota je záměrně vymazáno)

Výsledkem analýzy jednoho testu je pak např. „protokol“ (viz obrázek č. 12), na němž je zobrazen celý test v podobě grafického průběhu, tedy let i se skokem výšky a zásahem pilota a vypočtený „model“ chování pilota s uvedením vypočtených časových konstant pro zvolenou metodu výpočtu – model pilota (A až F). Variantně lze generovat i zprůměrované hodnoty pro celou realizovanou misi (10 „skoků výšky“) jak byla v rámci navrženého postupu testování realizována. Je zcela jasné, že tyto výsledky se obecně nezveřejňují v této podobě a jsou určeny především pro konkrétní testovanou osobu případně personál kolem simulátoru.

Daleko přehlednější a výraznou vypovídající hodnotu jsou pak tzv. histogramy (tedy sloupcové grafy vyjadřující počet údajů, spadajících do daného intervalu). Ty se musí vždy počítat s výběrem simulátoru, metodou výpočtu (model chování pilota) a vypočítaného koeficientu. Jde o statistiku, je tedy velmi vhodné mít poměrně hodně naměřených misí na konkrétním simulátoru, pilotů a spočtených analýz. Protože nás především zajímá časové zpoždění – tedy reakce pilota, je na obrázku č. 13 zobrazen příklad histogramu „dopravního zpoždění“ pro vybranou skupinu testovaných pilotů.



Obrázek č. 13: Příklad histogramu pro vyhodnocení dopravního zpoždění z vybrané skupiny testovaných pilotů

ZÁVĚR

Více jak desetileté testování začínajících pilotů – studentů z Univerzity obrany i pilotů z praxe v počtu 110, představují databázi 2363 naměřených misí a více jak 40 tis. analyzovaných datových souborů. Toto množství realizovaných matematických analýz dává možnost konstatovat, že můžeme vyřčené hypotézy, uvedené v úvodu článku konstatovat za splněné:

1. Dosažené výsledky potvrzují, že je možné opakovatelně testovat piloty v průběhu výcviku i v průběhu jejich další kariery a to nejen pro statistické účely, ale i pro osobní zjištění stavu schopností, potažmo vycvičenosti každého pilota.
2. Naměřená data z testů lze jednoznačně vyhodnocovat navrženým matematickým aparátem, přičemž větší část vyhodnocování je možné realizovat automaticky.
3. Z realizovaných testů se ukazuje schopnost vyšší vycvičenosti pilotů s vyšším náletem hodin v reálném provozu. Tento závěr je matematicky doložitelný a lze jej chápat i jako objektivně posouditelný.

Pro potřebu objektivního a opakovatelného použití testování pilotů na dostupných simulátorech byl vypracován „Návrh metodiky testování pilotů“³⁵. Tento Návrh metodiky obsahuje jak teorii matematické analýzy chování pilotů, Rozdělení postupu testování

³⁵ Jalovecký, R., Návrh metodiky testování pilotů, Univerzita obrany, Fakulta vojenských technologií, Katedra letecké techniky, 2019, Brno

na jednotlivých leteckých simulátorech konkrétní popis testování na simulátorech C172 – ČVUT, L159 – LZ Čáslav a především na simulátoru X-Plane – UO a to jak v ručním tak i automatickém režimu. Navržená metodika dále obsahuje popis všech vytvořených programů pro evidenci, zpracování dat a vyhodnocení analýz.

Autor: ***Prof. Ing. Rudolf Jalovecký, CSc.,** narozen 1956. V letech 1980, 1985 absolvent inženýrského studia a vědecké přípravy na Vojenské akademii v Brně působí od roku 1982 na katedrách Vojenské akademii a následně i Univerzity obrany odborně směřující letecké elektronice. V letech 2005–2012 byl pověřen vedením katedry Leteckých elektrotechnických systémů. Odborně se zabývá databázemi, leteckou elektronikou, měřením neelektrických veličin na letecké technice, vývoji měřících a řídicích systémů na bázi jednočipových mikroprocesorů, automatickými systémy řízení letu letadel a testováním schopností pilotů i studentů-pilotů.*

Jak citovat: JALOVECKÝ, Rudolf. Testování schopností pilotů na leteckých simulátorech. *Vojenské rozhledy*. 2024, 33 (1), 127-144. ISSN 1210-3292 (print), 2336-2995 (on-line). Available at: www.vojenskerozhledy.cz.