

Analýza chování pilota při řízení letu letounu s vyžitím leteckých simulátorů

Analysis of the pilot's behavior during flight control using flight simulators

Ing. Miroslav Jirgl

Ústav automatizace a měřicí techniky, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií,
Vysoké učení technické v Brně, Technická 3082/12, 616 00 Brno,

email: miroslav.jirgl@phd.feec.vutbr.cz,

prof. Ing. Rudolf Jalovecký, CSc.

Katedra leteckých elektrotechnických systémů, Fakulta vojenských technologií, Univerzita
obrany, Kounicova 65, 662 10 Brno, email: rudolf.jalovecky@unob.cz.

Resumé:

Článek prezentuje především výsledky disertační práce, která byla zpracovávána za výrazné podpory pracoviště katedry leteckých elektrotechnických systémů, Univerzity obrany. Výcvik pilotů, především pak vojenských pilotů, na kterém se univerzita obrany výrazně podílí, je velmi nákladnou činností. Všechna výcviková zařízení se snaží tyto náklady snížit, aniž by utrpěla podstata výcviku a především jeho bezpečnost. Autoři článku se věnují problematice speciálního testování pilotů již několik let a výsledkem jejich práce je další ucelené dílo v podobě disertační práce, kde jsou popsány metody pro hodnocení aktuálního stavu výcviku pilotů. Navržené testování a jeho následná analýza přitom nepředstavuje zvýšení nákladů na provádění vlastního výcviku. S nadsázkou lze tvrdit, že dokonce mohou zvýšit připravenost pilota na nestandardní průběh letu, kterým může být stranový stříh větru či výškový propad letu letounu.

This paper presents especially results of the doctoral thesis written by significant support of the Faculty of Military Technology, University of Defence. The pilots training, especially the training of military pilots, which University of Defence participates, is very expensive activity. The flight training centres are trying to reduce the costs without suffering the nature of training and above all security. The authors deal with special testing of pilots issue for several years. The result of this effort is the mentioned doctoral thesis which presents several approaches for assessment of actual state of pilot and level of training. Moreover, the proposed testing and its analysis do not mean increasing of costs within pilots training. There is a possibility that this testing may lead to increasing pilot's readiness to non-standard situations during flight, e.g. lateral winds hear or sudden altitude change.

1 Úvod

V rámci projektu TAČR TA04031376 Výzkum/vývoj metodiky výcviku leteckých specialistů L410 UVP - E20 pokračoval další výzkum testování chování pilotů za letu na simulátorech. V průběhu června 2015 až června 2016 proběhlo testování 9 pilotů – studentů Univerzity obrany na dvou simulátorech (nepohyblivém a pohyblivém). Zpracování získaných dat z měření reakcí na skokovou změnu výšky letu s úkolem návratu na původní výšku letu bylo poměrně náročné. V současné době se v databázi analyzovaných výsledků, viz [1, 2], nachází cca 6 tis údajů a to jak číselných – identifikované parametry modelů chování pilotů, tak i grafické výsledky z probíhajících analýz.

Člověk – pilot z pohledu kybernetiky plní při řízení letounu funkci lidského regulátoru. Tento regulátor je velmi univerzální a efektivní neboť dokáže rychle řešit neočekávané a nepředvídatelné situace a dokáže se přizpůsobit (adaptovat) změnám podmínek, avšak na rozdíl od automatického regulátoru podléhá různým vlivům, jako jsou stres, únava, apod., které mohou jeho schopnosti degradovat [3]. Schopnost adaptace na řízenou dynamiku a zároveň na změny podmínek je do jisté míry dána zejména kvalitou výcviku pilota a jeho zkušenostmi. Právě výcvik a zkušenosti jsou pak často rozhodujícím faktorem ovlivňujícím lidské chování v dané situaci.

2 Použité metody řešení

Pro účely hodnocení aktuálního stavu – zkušeností a míry výcviku pilota je nezbytné studium problematiky modelování lidského chování a následné sestavení základních modelů. Tyto modely, resp. jejich parametry, vypovídají o dynamických vlastnostech pilota. Na základě pozorování změn těchto parametrů v čase lze pak usuzovat na změny dynamického chování s ohledem na absolvovaný výcvik.

Jednou z možností, jak objektivně posoudit aktuální stav, resp. míru výcviku, pilota je hodnocení na základě měření reakcí pilota. To spočívá ve vytvoření matematického modelu chování pilota a identifikace jeho parametrů na základě opakovaných měření na leteckém simulátoru.

2.1 Matematický model chování pilota při řízení letu letounu

Modelování lidského chování je poměrně složitou záležitostí. Výzkumy provedené v minulých letech, zejména pak výzkumy lidského chování realizované profesorem D. T. McRuerem, však ukázaly, že po přijmutí určitých zjednodušení lze lidské chování (jeho dynamické projevy) z pohledu kybernetiky popsat pomocí lineárních dynamických systémů. Existuje několik variant

těchto modelů, viz např. [4, 5, 6], z nichž nejznámějším a dosud nejrozšířenějším je model ve tvaru přenosové funkce s dopravním zpožděním, viz rovnice (1) [4].

$$F(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = K \frac{(T_3 p + 1)}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)} \cdot \exp(-\tau p), \quad (1)$$

kde:

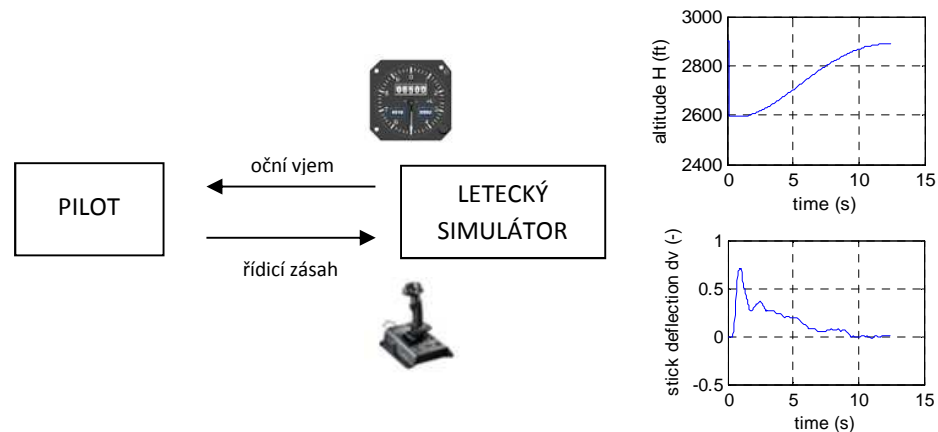
- K Zesílení reprezentující pilotovy zvyklosti na daný akční zásah. Souvisí také s poměrem vstupního a výstupního signálu.
- T_1 Setrvačná konstanta udávající pilotovo zpoždění činnosti dané neuromuskulárním systémem. Pohybuje se v rozsahu 0,05 až 0,2 s a není závislá na míře tréninku [3, 5].
- T_2 Zpožďující setrvačná konstanta charakterizující pohotovost a hbitost pilota. Souvisí tedy s prováděním naučených stereotypů a rutinních postupů. Pohybuje se v rozsahu 0,1 až jednotky sekund [3, 5, 7].
- T_3 Je prediktivní časová konstanta související se zkušenostmi pilota. Odráží pilotovu schopnost předvídat situaci, která může nastat. Tuto schopnost operátor získá výcvikem a zkušenostmi a pohybuje se v rozsahu 0,2 až jednotky sekund [3, 5, 7].
- τ Časová konstanta udávající zpoždění odezvy mozku pilota na pohybový a oční vjem. Vlivem únavy může dojít k prodloužení této konstanty a následnému selhání regulačních schopností pilota. Tato konstanta se pohybuje nejčastěji v rozsahu 0,1 až 1 s [3, 5, 7].
- p Laplaceův operátor

Model ve tvaru rovnice (1) je obecný model využitelný v širokém spektru činností spojených s řízením či pilotováním. Jednotlivé konstanty nabývají nejčastěji hodnot v uvedených rozsazích a charakterizují pilotovy schopnosti (možnosti) přizpůsobit se řízené dynamice (adaptovat se). Právě se schopnostmi a dovednostmi souvisí zejména tzv. regulační konstanty T_2 , T_3 a zesílení K . Poměr hodnot časových (regulačních) konstant T_2 a T_3 dále vypovídá také o způsobu a přístupu k řízení. Derivační časová konstanta T_3 totiž odráží pilotovu schopnost predikce dané situace, setrvačná konstanta T_2 zase zpoždění (dynamiku), resp. určitou laxnost pilota. Pomocí konstanty τ (reakční zpoždění pilota) lze posoudit zpoždění reakce pilota na danou událost.

2.2 Měření reakcí pilotů s využitím leteckého simulátoru

Měření odezev pilotů byla prováděna na stacionárním leteckém simulátoru na Univerzitě obrany v Brně. Simulátor na Univerzitě obrany je vybaven softwarem X-Plane-10 a umožňuje sběr různých letových, včetně provozních dat s frekvencí až 20 Hz [7].

Základní princip měření vychází z opakovaného měření odezvy (reakce) pilota na vizuální podnět – v tomto případě skoková změna výšky letu letounu o 300 ft, viz obr. 1. Pro možnost porovnání výsledků byl stanoven standardní ustálený let s následnou skokovou změnou výšky letu a s úkolem testovaného pilota co nejrychleji se vrátit na původní letovou hladinu. Podrobnější popis experimentu lze nalézt např. v [8].



Obr. 1: Princip měření odezvy (reakce) pilota na vizuální podnět pomocí leteckého simulátoru

3 Dosažené výsledky

V následujícím textu budou prezentovány výsledky dvou nezávislých sad měření s 8 reálnými piloty – studenty Univerzity obrany, získané na základě výše definovaného postupu.

První sada měření byla realizována v červnu 2015. Těchto měření se zúčastnilo všech 8 pilotů, jejichž letová praxe byla přibližně 70-80 nalétaných hodin.

Druhá sada měření se uskutečnila v prosinci 2015, tj. přibližně s půlročním odstupem. Během této doby piloti absolvovali povinný výcvik a jejich letová praxe tak byla v průměru 90-100 nalétaných hodin. Těchto měření se zúčastnilo pouze 7 pilotů, Pilot_7 nebyl při těchto měřeních k dispozici.

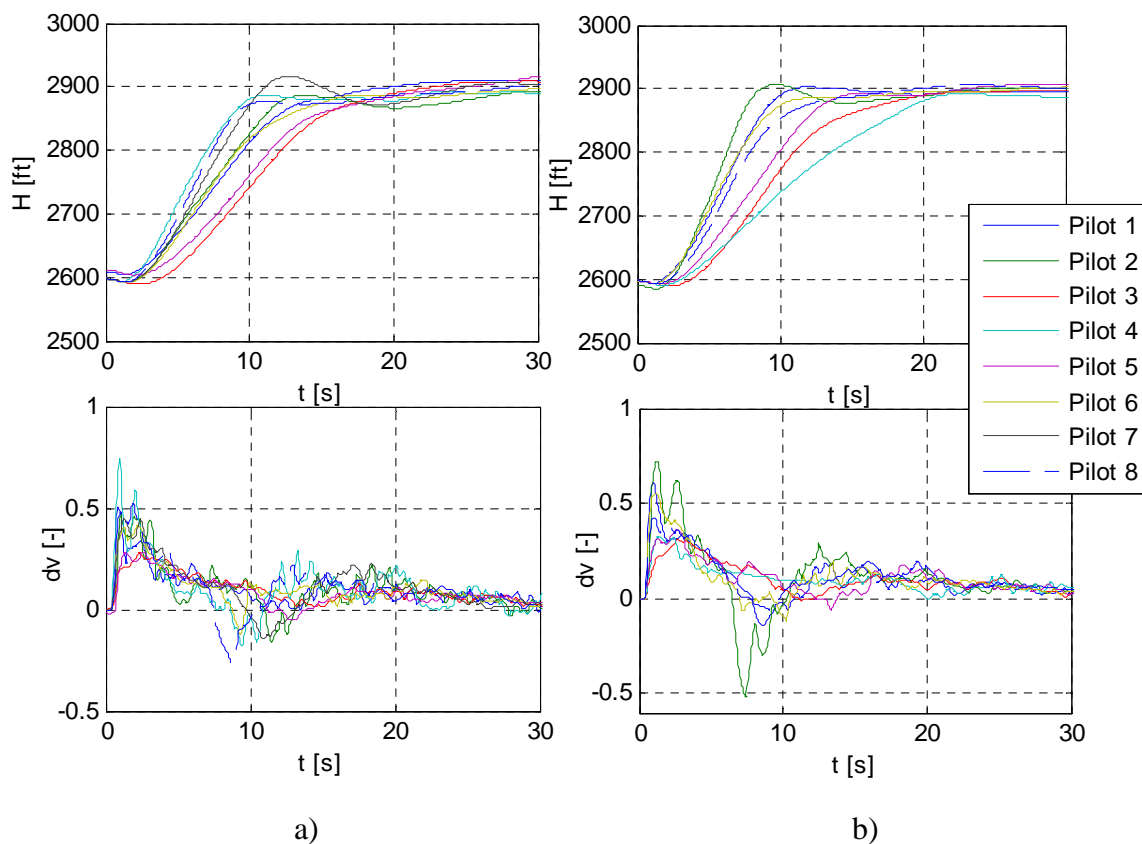
Obě sady měření probíhaly za stejných výchozích podmínek, tj.

- letoun: King Air C90B,
- výchozí výška: $H_0 = 2900$ ft,
- výchozí rychlost: $v_0 = 170$ mph,
- úhel náběhu, podélný sklon i jejich derivace (změna) byly přibližně nulové.

Každému pilotu pak byla několikrát za sebou skokově změněna výška, vždy s uvedením letounu do počátečního (výchozího) stavu letu. Základní ukázka z těchto měření byla publikována např. v [8, 9].

3.1 Hodnocení reakcí jednotlivých pilotů

Při jednotlivých - opakovaných měřeních se projevila určitá variabilita měřených charakteristik. Pro objektivní posouzení dynamických vlastností pilota je tedy vhodné pracovat s průměrnými odezvami (průběhy), viz obr. 2, kde spodní část obrázku zobrazuje průměrné reakce - řídicí zásahy pilotů ve formě výchylky kniplu $d\nu$ a horní část obrázku příslušné odezvy výšky letu letounu H pro obě sady měření.



Obr. 2: Průměrné reakce pilotů (výchylky kniplu $d\nu$) a příslušné odezvy výšky letu letounu H pro a) první, b) druhou sadu měření

Na základě průběhů na obr. 2 lze posoudit zejména přístup k řízení jednotlivých pilotů, což souvisí také s jejich schopnostmi a dovednostmi. Z průběhů odezvy výšky letounu H (horní část obrázku) je patrné, že většina pilotů vykazuje podobnou strategii řízení, a sice tzv. defenzivní. Tento přístup k řízení znamená, že je zde snaha pilota o dosažení požadované hodnoty bez překmitu, avšak za cenu delšího času. Výjimkou je Pilot_7 (částečně – zejména pak v případě druhé sady měření, i Pilot_2) jehož odezva odpovídá spíše tzv. ofenzivní, resp. agresivní, strategii řízení, což představuje co nejrychlejší dosažení požadované hodnoty i za cenu

překmitu od požadované hodnoty. Rozdíly ve způsobu a strategii řízení lze pak pozorovat i na průbězích výchylky kniplu dv (spodní část obrázku).

Další informací, kterou lze z průběhů získat, je rychlost odezvy, resp. doba potřebná dosažení požadované hodnoty t_w . Hodnoty tohoto parametru je pro jednotlivé piloty i sady měření jsou uvedeny v tab. 1.

	Rychlost odezvy - t_w [s]	
	1. sada měření	2. sada měření
Pilot_1	15	12
Pilot_2	13	9
Pilot_3	24	20
Pilot_4	11	22
Pilot_5	25	15
Pilot_6	17	12
Pilot_7	9	-
Pilot_8	12	13

Tab. 1: Zhodnocení rychlosti odezvy

Dalším krokem je vytvoření modelů chování pilota podle rovnice (1) a identifikace jejich parametrů. Pro tyto účely byly využity opět průběhy na obr. 2. Pro identifikaci parametrů byl využit vlastní identifikační algoritmus vytvořený v prostředí MATLAB, využívající optimalizační funkci *fminsearch*. Jako kriteriální funkce byla zvolena suma kvadrátu odchylek, viz (2).

$$KRIT = \sum_{i=1}^n (y(i) - y_m(i))^2, \quad (2)$$

kde:

y skutečná (naměřená) hodnota výstupní proměnné

y_m modelovaná hodnota výstupní proměnné

n délka dat

Výsledné parametry pro jednotlivé piloty pro obě sady měření (první sada – A, druhá sada – B) jsou shrnuty v tab. 2.

Z parametrů průměrného modelu chování pilotů uvedených v tab. 1 je zřejmé, že průměrné hodnoty neuromuskulárních časových konstant T_1 zůstávají při opakovaných měřeních prakticky konstantní, čímž se potvrdilo, že jejich hodnota je charakteristická pro každého pilota a není závislá na míře tréninku.

Velmi důležitým parametrem je doba reakce (dopravní zpoždění) pilota τ , která souvisí s tím, jak rychle je pilot schopen zareagovat na změnu situace. Hodnota tohoto parametru se pro všechny piloty, v některých případech i poměrně výrazně - viz např. Pilot_1 či Pilot_5, snížila. Výjimkou je pouze Pilot_4, u kterého se naopak tato doba prodloužila asi o 0.1 s. V případě zesílení K a regulačních konstant T_2 a T_3 charakterizujících schopnost adaptace pilota na řízenou dynamiku a rychlost celkové odezvy došlo rovněž ve většině případů ke změně. Změna těchto parametrů koresponduje s průběhy na obr. 2 a také s hodnocením rychlosti odezvy, viz tab. 1.

	$K \cdot 10^{-4}$ [-]		T_1 [s]		T_2 [s]		T_3 [s]		τ [s]	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
Pilot_1	6,87	8,18	0,13	0,13	0,25	0,96	1,39	2,58	0,64	0,53
Pilot_2	6,41	7,19	0,13	0,14	1,26	1,56	3,34	7,34	0,71	0,65
Pilot_3	5,59	6,09	0,06	0,08	2,11	2,33	2,99	3,57	0,66	0,63
Pilot_4	7,49	5,40	0,07	0,07	1,00	1,50	3,25	2,94	0,59	0,69
Pilot_5	5,13	6,69	0,17	0,18	1,63	1,86	3,74	3,37	0,83	0,65
Pilot_6	6,57	7,15	0,12	0,12	1,42	1,28	3,21	4,50	0,63	0,61
Pilot_7	7,32	-	0,17	-	1,78	-	3,80	-	0,62	-
Pilot_8	7,16	7,41	0,09	0,07	1,31	1,40	4,03	3,03	0,67	0,60

Tab. 2: Parametry průměrného modelu chování pilotů pro jednotlivé sady měření (A - první sada měření, B – druhá sada měření)

4 Závěr

Cílem tohoto příspěvku bylo ukázat některé metody pro možnost měření a vyhodnocení reakcí pilota pro účely možnosti hodnocení jeho aktuálního stavu, resp. míry výcviku, z pohledu dynamického chování. Pro tyto účely byly provedeny 2 nezávislé sady měření s reálnými piloty. Hodnocenými parametry byly v tomto případě zejména doba reakce, způsob a přístup k řízení a rychlost odezvy. Tato hodnocení byla provedena jednak porovnáním grafických průběhů pro jednotlivé sady měření, a dále pak na základě změn hodnot identifikovaných průměrných parametrů modelu chování pilotů pro tyto sady měření. Tyto změny byly ve většině případů pozitivní, tzn., že došlo ke zlepšení. Výjimkou je pouze jeden z pilotů, u kterého došlo paradoxně ke zhoršení, a to v případě všech hodnotících kritérií. Interpretace tohoto výsledku není zcela jednoznačná, neboť se může jednat o změny způsobené zhoršením zdravotního a psychického stavu nebo se může jednat o efekt tzv. přeučení. Tyto změny jsou předmětem dalšího zkoumání.

Autoři článku se tématem měření a modelování lidského chování zabývají již několik let a dosažené výsledky byly průběžně publikovány. Provedená měření byla realizována vždy na stacionárním leteckém simulátoru na Univerzitě obrany. V současné době probíhají i další měření na dalších typech simulátorů, např. na pohyblivém simulátoru na ČVUT v Praze. Získaná data jsou nyní analyzována a jsou předmětem dalších výzkumů.

V nadcházejícím období je předpoklad dalších měření také na simulátoru L410 ve firmě Lets'Fly. Jde o stacionární simulátor s věrnou kabinou letounu L410, včetně všech plně funkčních přístrojů a vizuální projekcí na polokruhové ploše.

Literatura

- [1] Jalovecký, R., Program pro evidenci naměřených dat a výsledků analýzy chování člověka při řízení letu letounu HUFA_V, In: Sborník příspěvků 14. Mezinárodní konference Měření, diagnostika a spolehlivost palubních soustav letadel. Univerzita obrany, Brno, 2014. ISBN 978-80-7231-970.
- [2] Jalovecký, R., Program pro analýzu naměřených dat chování člověka při řízení letu letounu HUFA_M, In: Sborník příspěvků 14. Mezinárodní konference Měření, diagnostika a spolehlivost palubních soustav letadel. Brno: Univerzita obrany, 2014. ISBN 978-80-7231-970.
- [3] Jirgl, M., Analýza modelů chování pilota při řízení letu letounu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav automatizace a měřicí techniky, 2016. 142 s. Dizertační práce.
- [4] McRuer, D.T., Krendel, E.S.: *Mathematical Models of Human Pilot Behavior*, AGARD-AG-188, (1974)
- [5] Havlikova, M.: *Diagnostika systémů s lidským operátorem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav automatizace a měřicí techniky, 2008. Dizertační práce.
- [6] HESS, Ronald A. *Candidate Structure for Modeling Pilot Control Behavior with Sudden Changes in Vehicle Dynamics*. In: *AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference*. Illinois: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2009, p. 18.
- [7] Bořil, J., *Analýza mechatronické soustavy pilot - letoun - autopilot z hlediska systémů automatického řízení letu letounu*. Doctoral Thesis (in Czech). Brno: Univerzita obrany, 2013. Dizertační práce.
- [8] Jirgl, M.; Jalovecký, R., *Měření a hodnocení reakcí pilota*. In *Sborník příspěvků 15. mezinárodní konference Měření, diagnostika, spolehlivost palubních soustav letadel*. Brno: Univerzita obrany, 2015. s. 109-114. ISBN: 978-80-7231-435- 5.
- [9] Jirgl, M., Havlikova, M. Bradac, Z.: *The Dynamic Pilot Behavioral Models*. In: *25th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation*, DAAAM. Vienna, 2014.

Dedikace

Článek vznikl na základě projektu TAČR TA04031376 Výzkum/vývoj metodiky výcviku leteckých specialistů L410 UVP - E20 a současně byla podpořena IT4Innovations Projekt Centra excelence (CZ.1.05/1.1.00/02.0070), financovaného Evropským fondem pro regionální rozvoj a státního rozpočtu České republiky prostřednictvím Operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace, jakož i Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy prostřednictvím projektu Výzkum, vývoj a inovace infrastruktury (LM2011033).

Článek byl vypracován v rámci dílčího záměru rozvoje organizace UO-FVT s názvem „Výzkum sensorických a řídicích systémů pro získání informační převahy na válčišti“.

Publikace vznikla také za podpory grantu "Výzkum nových řídicích metod, měřicích postupů a inteligentních prostředků v automatizaci" financované z Interní grantové agentury Vysokého učení technického v Brně (číslo grantu FEKT-S-14-2429).