

# **Eksperimentalni sistem za haptično pogonsko ročico letala s hibridno električnim pogonom**

**Mitja Golob, Rok Pučko, Milan Čurkovič, Aleš Hace**

**UM-FERI, Smetanova ulica 17, 2000 Maribor, Slovenija**

**mitja.golob@um.si, rok.pucko@um.si, milan.curkovic@um.si, ales.hace@um.si**

## ***The experimental system of a haptic power lever for a hybrid electric aircraft***

In recent years, the electric vehicles have made a significant progress due to advantages such as increased efficiency, the clean use and the low energy consumption. These are the main reasons why the hybrid electric propulsion becomes more popular in the field of aviation as well. On the other hand, increased complexity of the powertrain and additional electronic devices cause control more complex. In the past, pilots controlled an aircraft by mechanical levers and steel wires, which are now replaced by electronic systems for flying control and power setting. Main disadvantages of these systems are that they lack a real input feel for a pilot since his/her movement of the lever isn't physically connected to the system. The communication with the system is carried out more or less exclusively through visual displays in the cockpit. This makes the control non-intuitive and non-optimal as a consequence.

This paper presents the experimental system of a haptic power lever for a small hybrid electric aircraft, which was developed within the HYPSTAIR project (FP7) and represents an upgrade for an aircraft cockpit with innovative HMI.

## ***Kratek pregled prispevka***

V zadnjih letih električna vozila doživljajo velik napredek, predvsem zaradi manjše porabe goriva, večje učinkovitosti in okolju prijazne uporabe. Prav zaradi teh prednosti se (hibridno) električni pogoni vse bolj uveljavljajo tudi v letalih. Upravljanje letala pa postaja zaradi kompleksnejše zasnove pogonskega sklopa in vključevanja številnih dodatnih sistemov vse bolj zahtevno. Piloti so v preteklosti letala upravljali s pomočjo vzvodov in jeklenih vrvi, ki so jih danes začeli nadomeščati elektronski sistemi za upravljanje in nastavitve moči. Glavna pomanjkljivost takšnih sistemov je izguba naravne povratne informacije za pilota, saj komunikacija s sistemom poteka bolj ali manj izključno vizualno preko prikazovalnikov v pilotski kabini. S tem postane upravljanje letala neintuitivno in posledično neoptimalno.

V prispevku bo predstavljen eksperimentalni sistem za haptično pogonsko ročico manjšega hibridno električnega letala, ki je bil razvit v sklopu evropskega projekta HYPSTAIR (FP7) in predstavlja nadgradnjo pilotske kabine z inovativnim HMI-jem.

## 1 Uvod

Letala so v zadnjih desetletjih postala izredno kompleksni mehatronski sistemi, dodatno kompleksnost pa predstavlja še uvajanje različnih naprednih električnih pogonskih sistemov. Čeprav je letalo v osnovi sestavljeno iz velike množice komponent, pa verjetno za pilota predstavlja pilotska kabina osrednji del letala. V njej namreč poteka upravljanje, izvrševanje nadzora, in vodenje letala. V pilotski kabini so prikazane vse informacije, ki so pomembne za izvajanje procesa letenja in omogočajo varno izvajanje poletov. Pri tem pa je večina novejših letal vedno pogosteje opremljena z večjim številom digitalnih prikazovalnikov, ki prikazujejo najrazličnejše parametre oz. informacije. Vzorec branja posameznih parametrov in interpretacija le-teh pa sta v največji meri odvisna od posameznika [1]. To pomeni, da lahko prihaja v primeru preobremenjenosti pilota tudi do neustrezne interpretacije posameznih informacij in do posledično neintuitivnega ter neustreznega upravljanja. Zaradi tega je smiselno poseči v zasnovo vmesnika človek-stroj, saj lahko na ta način bistveno izboljšamo tok informacij med pilotom in letalom. Na ta način namreč želimo doseči predvsem bolj intuitivno, varno in tudi karseda preprosto upravljanje letala [2].

Človek komunicira z okoljem preko različnih čutil. Zaradi tega so tudi napredni uporabniški vmesniki največkrat, zasnovani multimodalno, predvsem z namenom učinkovitejše in prijaznejše izmenjave informacij [3]. Posebej to velja za primer upravljanja sodobnih mehatronskih sistemov, kjer se ne moremo izogniti določenim varnostnim tveganjem. Zanimiv je preprost primer uporabe vibracijskega opozarjanja pri sprejemu sporočila na mobilnem telefonu, kjer gre za stimulacijo človekovega haptičnega čuta. Takšen haptični vmesnik podaja samo nujno potrebno informacijo o prispelem sporočilu 'pravi osebi, ob pravem času', brez dodatne potrebe po usmerjeni vizualni pozornosti. Haptični vmesnik torej lahko zmanjša kompleksnost podajanja informacij. Dobro načrtovan in tudi izveden uporabniški vmesnik se mora čim bolj prilagoditi

človeku, ga narediti intuitivnega in transparentnega, s čimer lahko dosežemo boljšo komunikacijo in s tem tudi boljšo uporabniško izkušnjo za različne uporabnike.

Pri načrtovanju in oblikovanju novih naprednih uporabniških vmesnikov moramo biti pozorni na to, da poiščemo najhitrejšo in najbolj naravno pot od uporabnika do stroja, pri čemer je treba seveda tudi upoštevati nekatere človeške omejitve (hitrost obdelave informacij, ustrezna izbira komunikacijske poti za posamezne informacije itd.). Pri uporabi haptičnih vmesnikov pa je bistveno predvsem, da poiščemo bogate in dovolj različne kode za vhodno/izhodne haptične operacije, ki se jih uporabnik lahko hitro in preprosto nauči [4].

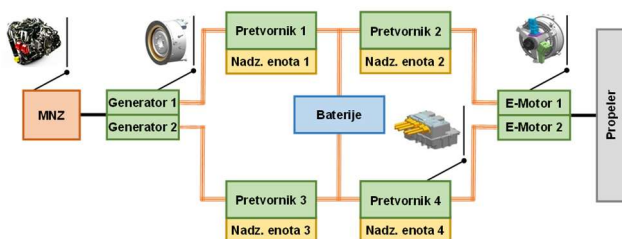
V nadaljevanju članka bomo predstavili razvoj inovativnega uporabniškega vmesnika (ang. *Human Machine Interface, HMI*), ki poenostavlja upravljanje z zahtevnim pogonskim sklopom. V projektu HYPSTAIR razvit hibridni pogonski sklop ima ob klasičnem pogonskem sistemu integriran tudi električni motor, generator in baterije. Takšna sistemska integracija pa posledično pomeni kompleksnejši sistem z veliko težjim upravljanjem in potrebo po spremljanju mnogih informacij. Zaradi tega je bil v sklopu projekta razvit tudi napredni uporabniški vmesnik, ki pilotu posreduje relevantne informacije o stanju pogonskega sistema v obliki povratne haptične informacije [5]. Na ta način želimo doseči preprostejše in varnejše upravljanje in s tem posledično tudi razbremenitev pilota.

## 2 Sistemska arhitektura pogona letala

Glavni namen projekta HYPSTAIR je bil razvoj, verifikacija in validacija komponent serijskega hibridnega pogonskega sistema za majhna letala. Pri tem je bila za glavno sistemsko arhitekturo pogonskega sklopa letala izbrana serijska hibridna različica pogona [6]. Prednosti uporabe hibridno električnega pogona napram klasičnemu konvencionalnemu pogonu so v boljšem izkoristku, tišjem delovanju, okolju prijaznejši uporabi in manjši porabi goriva, slabost pa v podvajanju komponent, kar vpliva na povišanje mase in posledično tudi na ceno letala.

V primerjavi s popolnoma električnim pogonom pa uporaba hibridno električnega pogona omogoča podaljšanje doseg [7].

V projektu razviti hibridno električni pogonski sklop na sliki 1 tvorijo motor z notranjim zgorevanjem (MNZ), generator, pretvorniki, kontrolne enote, električni motor in baterijski sistem, ki je nameščen v krilih letala. Pogonski motor, ki zagotavlja 200 kW vzletne moči, 150 kW stalne moči, in generator, ki nudi do 100 kW moči, se odlikujeta z energijsko gostoto, večjo od 5 kW/kg in dvojnimi navitjem ter štirimi regulatorji moči ter pretvorniki. Pogonski sistem je zaradi varnostnih zahtev zgrajen z redundanco, s čimer je v veliki meri izključena možnost popolne izgube pogonske moči med letom [8].



Slika 1: Hibridno električni pogonski sklop letala.

Pogon lahko v osnovi obratuje v treh načinih: izključno električni, ki kot vir moči uporablja baterije; način, ki uporablja izključno generator; in hibridni način, ki pri delovanju združuje oba vira energije.

Kljub mnogim navedenim prednostim hibridno električnega pogonskega sistema pa izredno kompleksna struktura takšnega sistema povzroča, da upravljanje letala za pilota postane precej zahtevno in obremenjujoče. Zaradi tega je bil v sklopu projekta razvit tudi napredni uporabniški vmesnik, zasnovan z namenom poenostavitve upravljanja z zahtevnim pogonskim sklopom.

### 3 Upravljanje pogonskega sklopa letala

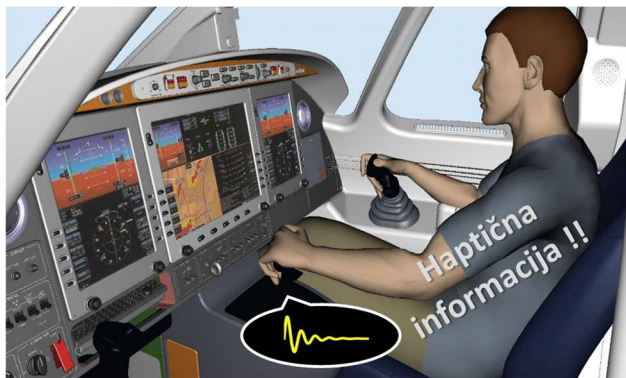
Glavno pomanjkljivost naprednih sistemov upravljanja letala, kot so elektronski sistemi za

upravljanje in nastavitve moči (ang. *Fly/Drive By Wire*) predstavlja izguba haptične povratne informacije, ki je za pilota ključna in bistveno pripomore k boljši učinkovitosti in odzivnosti. V tem primeru namreč komunikacija med pilotom in sistemom poteka bolj ali manj izključno vizualno preko prikazovalnikov v pilotski kabini.

Po drugi strani pa tudi zaradi vse bolj kompleksne zasnove pogonskega sklopa in vključevanja številnih dodatnih funkcij upravljanje postaja vse bolj zahtevno. Seveda ta povečana zahtevnost upravljanja pomeni tudi potrebo po spremljanju mnogih informacij, ki so nujno potrebne za učinkovito in varno upravljanje letala oz. pogonskega sklopa. To pa pomeni, da vseh potrebnih informacij ne moremo prikazati zgolj na enem samem zaslonu. Pri običajni razporeditvi kontrolnih instrumentov v pilotski kabini pa lahko pri posredovanju večje količine informacij v določenih trenutkih prihaja do prenasičenosti z informacijami. Treba je namreč vedeti, da se je s tehnološkim napredkom tudi vizualna predstavitev informacij v pilotski kabini močno spremenila. Če so piloti še ne dolgo nazaj informacije prejemali preko preprostih analognih prikazovalnikov (kompas, merilnik hitrosti, višinomer itd.), ki so bili namenjeni za prikaz določenih parametrov, je danes temu popolnoma drugače. Današnji uporabniški vmesniki, zasnovani na elektronskih sistemih letalskih instrumentov (ang. *Glass Cockpit*), so gledano s stališča uporabe zaradi tega veliko bolj kompleksni. V pilotsko kabino namreč prihaja ogromno različnih informacij, ki jih mora pilot karseda hitro obdelati, pri tem pa je pravočasno upravljanje teh podatkov, še zlasti v časovno kritičnih fazah za pilota izredno težavno. Ob tem pa se je treba tudi zavedati, da mora pilot vsako informacijo posebej prepoznati, analizirati in ustrezno interpretirati, kar zahteva določen čas. Vse to skupaj pa utegne povzročiti preobremenjenost in zmedo pilota, kar lahko ima za posledico neintuitivno, neoptimalno upravljanje in ne nazadnje je lahko s tem tudi resno ogrožena varnost nadzora leta.

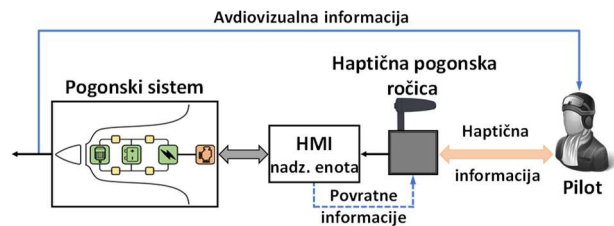
Zaradi tega je bil za nadzor nad stanjem in delovanjem pogonskega sklopa razvit nov integriran namenski uporabniški vmesnik. V

sklopu slednjega je bila razvita tudi haptična pogonska ročica, ki pilotu omogoča nastavitve moči in preko povratnih informacij (v obliki sile) hkrati prepoznavanje odziva sistema od sprememb v delovanju do prepoznavanja napak. Haptična pogonska ročica tako pilotu omogoča nadziranje moči pogonskega sklopa, hkrati pa služi tudi za komunikacijo s sistemom. Pri tem se določene informacije, ki se v današnjih letalih še vedno prenašajo do pilota zgolj vizualno (preko različnih prikazovalnikov in zaslonov v pilotski kabini) prevedejo v obliko povratne sile [9]. Tako lahko na podlagi intuitivnega človekovega tipnega čuta pilota razbremenimo procesiranja množice vizualnih informacij, saj smo jih nadomestili z veliko bolj intuitivnimi haptičnimi informacijami (slika 2).



Slika 2: Haptična pogonska ročica s haptično informacijo opozarja pilota na različna stanja pogonskega sklopa letala.

Na sliki 3 je podana principiela shema upravljanja pogonskega sklopa s haptično pogonsko ročico. Sistem sestavljajo hibridno električni pogonski sklop, nadzorni računalnik, haptična pogonska ročica in pilot. Haptična pogonska ročica in pogonski sklop sta medsebojno povezana preko nadzorne enote. Slednja na podlagi pridobljenih informacij od pogonskega sklopa aktivira posamezne haptične signale, ki jih haptična pogonska ročica nato prevede v obliko povratne sile. To pomeni, da medtem ko pilot drži haptično pogonsko ročico in z njo tudi upravlja, hkrati nanj deluje tudi povratna sila, ki jo generira haptična pogonska ročica.



Slika 3: Principielna shema upravljanja pogonskega sklopa letala.

Haptična pogonska ročica torej dopolnjuje vizualne in zvočne informacije z bolj intuitivnimi 'naravnimi' haptičnimi povratnimi informacijami.

#### 4 Eksperimentalni sistem

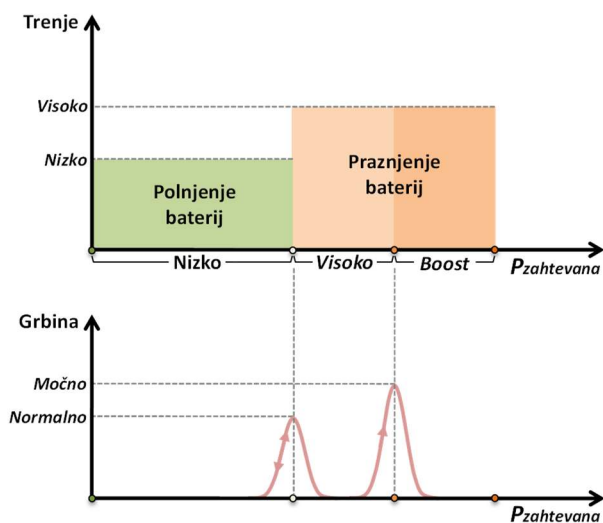
Eksperimentalni sistem haptične pogonske ročice na sliki 4 je bil namenjen za preizkušanje različnih haptičnih signalov skupaj s človekom v povratni zanki. Pri tem je bil celotni algoritem vodenja zasnovan v programskem okolju Matlab/Simulink in implementiran na haptičnem krmilniku, katerega osnovo predstavlja zmogljiv digitalni signalni procesor (ang. *Digital Signal Processor, DSP*) [10].



Slika 4: Eksperimentalni sistem haptične pogonske ročice.

Pri tem so bili različni haptični signali namensko dodeljeni za predstavitev določenega stanja pogonskega sistema, s čimer smo dosegli dovolj bogate in hkrati tudi dovolj različne haptične kode. Na ta način smo lahko gledano s stališča uporabnika dosegli preprosto, hitro in nedvoumno interpretacijo posameznih informacij [11].

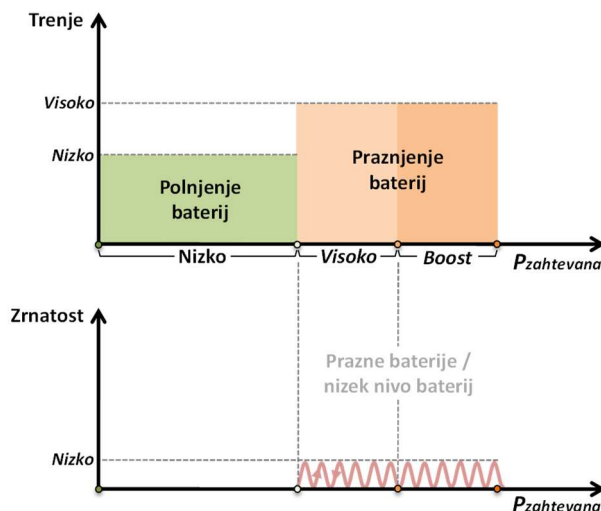
Spodaj sta podrobneje predstavljena dva primera različnih haptičnih kod (*trenje in grbina* ter *trenje in zrnatost*). Prva haptična koda (slika 5) je bila dodeljena predstavitvi stanja pogonskega sklopa v primeru, ko pilot zahteva različne nivoje oz. ravni pogonske moči in je leta tudi na voljo. Druga haptična koda (slika 6) je bila dodeljena predstavitvi stanja pogonskega sklopa v primeru, ko pilot zahteva večjo pogonsko moč, kot je trenutno na voljo, ob čemer so baterije izpraznjene oz. na nizkem nivoju napolnjenosti.



Slika 5: Haptična koda – trenje in grbina.

Opis haptične kode – *trenje in grbina* (slika 5): v področju nizke zahtevane moči pilot zaznava zgolj nizko raven trenja. Pri prehodu iz področja nizke zahtevane moči v področje visoke zahtevane moči pilot zazna grbino z nizko amplitudo. Nadalje pilot zaznava zgolj visoko raven trenja, dokler ne preide območja med visoko in dodatno (ang. *Boost*) zahtevano močjo. Pri prehodu slednje namreč zazna grbino z visoko amplitudo. Pri nadaljnjem premiku haptične pogonske ročice vse do končnega položaja pilot zaznava zgolj visoko raven trenja. Podobno je pri premiku haptične pogonske ročice v nasprotni smeri, s to razliko, da pri prehodu iz področja dodatne moči v področje visoke zahtevane moči pilot ne zazna grbine z visoko amplitudo. Pri prehodu iz področja visoke zahtevane moči v področje nizke zahtevane moči pa pilot zazna grbino z nizko amplitudo. Pri nadaljnjem premiku haptične pogonske ročice

vse do začetnega položaja pilot zaznava zgolj nizko raven trenja.



Slika 6: Haptična koda – trenje in zrnatost.

Opis haptične kode – *trenje in zrnatost* (slika 6): v področju nizke zahtevane moči pilot zaznava zgolj nizko raven trenja. Pri prehodu iz področja nizke zahtevane moči v področje visoke zahtevane moči pilot zaznava visoko raven trenja in zrnatost z nizko amplitudo. Pri nadaljnjem premiku haptične pogonske ročice vse do končnega položaja pilot zaznava visoko raven trenja in zrnatost z nizko amplitudo. Podobno velja pri premiku haptične pogonske ročice v nasprotni smeri [12].

V osnovi eksperimentalni sistem haptične pogonske ročice omogoča pilotu nastavitve moči, generiranje haptičnih informacij, prilagoditev nivoja sil situaciji in uporabniku ter možnost opozarjanja pilota na različna stanja pogonskega sklopa. Pri tem smo z različnimi haptičnimi kodami tako zagotovili intuitiven nadzor nad kompleksnim hibridno električnim pogonskim sklopom ter na ta način tudi povečali raven varnosti leta.

## 5 Zaključek

V prispevku smo predstavili napredni uporabniški vmesnik s haptično pogonsko ročico. Eksperimentalni sistem haptične pogonske ročice je uspešno prikazal simuliranje upravljanja pogonskega sklopa. Pri tem uporabljene različne haptične kode poustvarjajo

haptično izkustvo, kot ga lahko zaznamo v naravi in katere spodbudijo intuitivni človeški odziv. Različni haptični signali, kot so *trenje*, *zrnatost*, *grbina* itd., so bili namensko dodeljeni posameznim različnim stanjem pogonskega sklopa s ciljem doseganja čim bolj intuitivnega upravljanja in čim bolj učinkovite rabe energije.

S pomočjo haptične pogonske ročice smo torej zagotovili, da lahko pilot kontinuirano sprejema relevantne informacije o stanju pogonskega sistema (status baterije, sistemska opozorila, stanje razpoložljive pogonske moči itd.), brez kakršne koli potrebe po dodatni usmerjeni vizualni pozornosti, s katero bi lahko negativno vplivali na upravljanje letala. Pri vsem tem pa smo, kar je najbolj pomembno dosegli tudi zeleno razbremenitev pilota, v smislu zmanjšanega procesiranja množice vizualnih informacij.

## 6 Zahvala

Projekt HYPSTAIR je bil financiran iz 7. okvirnega programa EU za raziskave, tehnološki razvoj in predstavitve, s sporazumom št. 605305. Partnerji v projektu so bili Pipistrel d.o.o. Ajdovščina (Slovenija), Siemens AG (Nemčija), MBVision (Italija), Univerza v Pisi (Italija) in Univerza v Mariboru (Slovenija).

## 7 Literatura

- [1] B. Jurančič, Koncept letalskih kokpit sistemov z naprednimi integriranimi vmesniki človek-stroj, magistrsko delo, Fakulteta za gradbeništvo, prometno inženirstvo in arhitekturo, Maribor, junij 2013.
- [2] A. Hace, M. Golob, Haptic Interfaces (a survey for hypstair project): HYPSTAIR PF7-AAT-2013-RDT-1 T3.3: research and development of haptic interfaces, UM FERI, Maribor, Slovenia, 2014.

- [3] J. Guna, J. Žilavec, Večmodalna interakcija v navideznih okoljih, Fakulteta za elektrotehniko v Ljubljani, ERK 2010, Portorož, Slovenija, 20. – 22. september 2010.
- [4] M. Mihelj, Haptični roboti – 1. izdaja, Fakulteta za elektrotehniko v Ljubljani, 2007.
- [5] V. Cipolla, F. Oliviero, HyPSim: A Simulation Tool for Hybrid Aircraft Performance Analysis, Variational Analysis and Aerospace Engineering, vol. 116, Springer Optimization and Its Applications, Switzerland, December 2016.
- [6] Hypstair project, Development and validation of hybrid propulsion system components and sub-systems for electrical aircraft, dostopno na: <http://www.hypstair.eu/> (1.3.2017).
- [7] T. Tomažič, D. Matko, G. Veble, J. Tomažič, Tehnologija za letenje s hibridnimi pogoni HYPSTAIR, Pipistrel d.o.o. Ajdovščina, ERK 2014, Portorož, Slovenija, 22. – 24. september 2014.
- [8] H. Wyczisk, C. Zeumer, HYPSTAIR – System Architecture, Certifiability and Safety Aspects, Siemens AG 2016, Symposium E<sup>2</sup>-Fliegen, Stuttgart, 18. February 2016, Germany.
- [9] A. Hace, Haptic solutions of hybrid aircraft developed in HYPSTAIR and future challenges: lecture at International school of mathematics "Guido Stampacchia", 64th Workshop Variational analysis and aerospace engineering III: mathematical challenges for the aerospace of the future, Erice-Sicily, 28. August – 5. September 2015.
- [10] M. Čurkovič, R. Pučko, M. Golob, A. Hace, Dvoosni krmilnik za hitro eksperimentiranje v robotskih aplikacijah, UM-FERI, AIG'17, Maribor, Slovenija, 6. – 7. april 2017.
- [11] A. Hace, Experimental prototype system for haptic power lever: HYPSTAIR T3.3 Report No. 2: project task summary version 1.0. Maribor: UM FERI, 2016.
- [12] A. Hace, Haptics in cockpit environment (HYPSTAIR project – haptic interfaces), University of Maribor, Symposium E<sup>2</sup>-Fliegen, Stuttgart, 18. February 2016, Germany.