

Fyzika v letadle

PAVEL BÖHM, LUCIE FILIPENSKÁ
KDF MFF UK v Praze

Abstrakt

Domluvili jsme se s akrobatickými piloty, osadili jejich letadlo i piloty samotné kamerami a měřicími přístroji Vernier a studovali jsme průběh akrobatického letu.

Použité vybavení

Kromě letadla a nadšených (téměř) ke všemu ochotných pilotů jsme použili také:

- datalogger Vernier LabQuest 2 [1]
- akcelerometr pro velká zrychlení [2]
- barometr [3]
- bezdrátový měřič tepové frekvence [4]
- software Vernier Logger Pro [5]
- sadu kamer, z nichž některé jsme přilepili na křídlo, ocas a do kokpitu

Co jsme zjistili – náměty na aktivity se žáky

Stroboskopický efekt

Při sledování videozáznamu startu letadla je na vrtuli krásně pozorovatelný stroboskopický efekt. Nejprve se vrtule zdánlivě otáčí na jednu stranu, během krátké chvíle se zastaví, začne se otáčet na druhou stranu a letadlo vyrazí prudce dopředu.

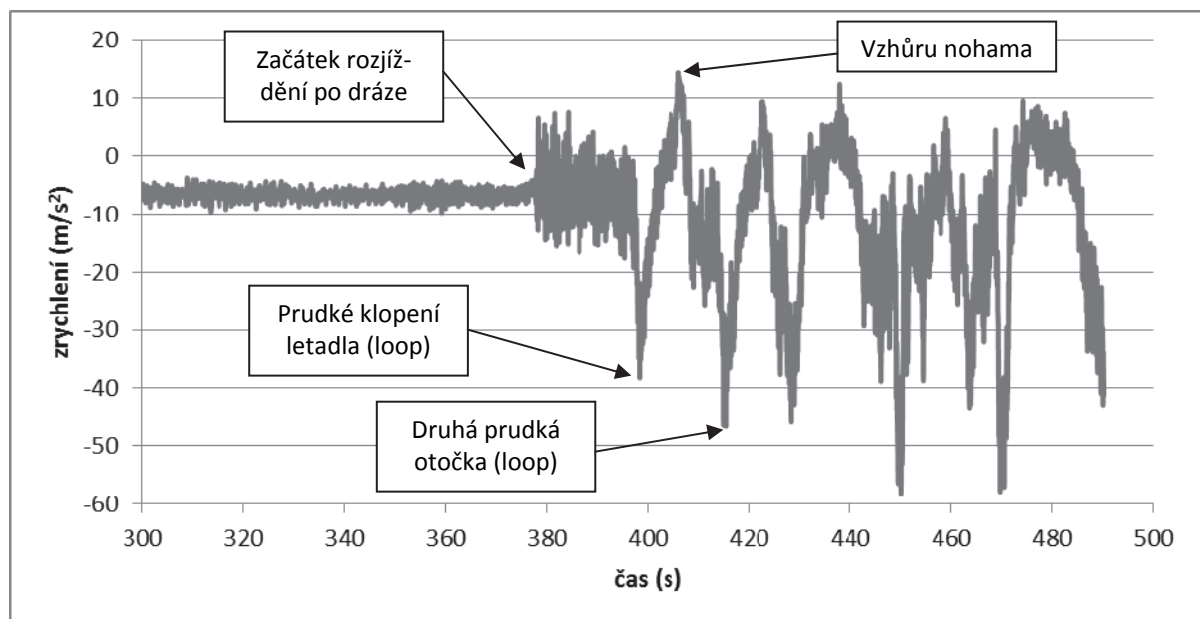
Pružnost křídel, práce klapek

Na videozáznamu z křídla letadla si můžeme povšimnout, že celé letadlo je ve skutečnosti velice pružné, křídla se za letu viditelně ohýbají. Lze také sledovat práci klapek při jednotlivých manévrech.

Data z akcelerometru

Vernier nabízí několik různých akcelerometrů: jednoosý akcelerometr do 5 g, tříosý akcelerometr do 5 g, zabudovaný tříosý akcelerometr v LabQuestu 2 (do 2 g) a také jednoosý akcelerometr pro velká zrychlení do 25 g. Vzhledem k očekávaným velkým zrychlením jsme použili právě posledně jmenovaný akcelerometr [2].

Senzor jsme umístili tak, aby měřil ve směru nohy–hlava. Tento směr je pro piloty nejdůležitější, v tomto směru je totiž lidské tělo na přetížení nejcitlivější. Příliš velké hodnoty přetížení mohou způsobit ztrátu vědomí.



Obr. 1. Data z akcelerometru.

Graf na obrázku 1 zachycuje prvních zhruba 380 sekund jemné chvění letadla, když čeká na začátku rozjezdové dráhy a zahřívá motor.

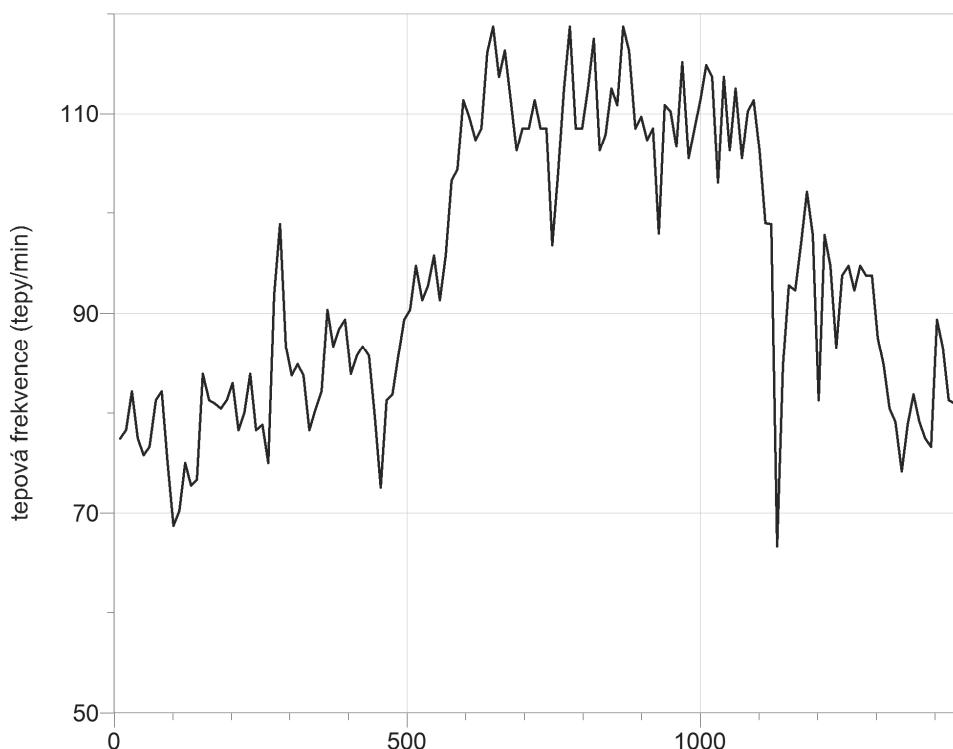
Pozorní žáci si všimnou, že střední hodnota není 10 m/s², ale méně, přibližně 7 m/s². Můžete je nechat, aby přišli na příčinu – tou je skutečnost, že pilot nesedí v letadle rovně. Je s celou sedačkou skloněn, takže se do směru nohy-hlava promítá jen část tíhového zrychlení.

Dalších 20 sekund (od času 380 s do času 400 s) je střední hodnota opět okolo 7 m/s², ale roztřesení je výrazně větší, protože letadlo startuje.

Následují výrazné změny zrychlení při provádění akrobatické sestavy. První výrazné lokální minimum odpovídá prudkému klopení letadla (loop s výškovým ziskem), které nakonec skončí hlavou vzhůru, čemuž odpovídá první výrazné lokální maximum. Následně se pilot při horizontálním letu otočí zpět na „nohy“ a pět sekund tak letí, čemuž odpovídá pětisekundový úsek v grafu od času 408 s do času 413 s. Pak následuje druhý prudký loop atd.

Tepová frekvence

Čidlo tepové frekvence [4] měl pilot během letu upnuté kolem hrudníku a data byla bezdrátově přenášena do dataloggeru LabQuest. Z grafu na obrázku 2 je vidět, že tepová frekvence během letu vzrostla, po přistání zase klesla k původní hodnotě. Je zajímavé, že jeden z pilotů měl při akrobatické sestavě tep 140 tepů/min (což odpovídá poměrně intenzivnímu sportovnímu výkonu), zatímco druhý 110 tepů/min. Druhý pilot je pověstný svou klidnou povahou, sami jsme se o ní přesvědčili.



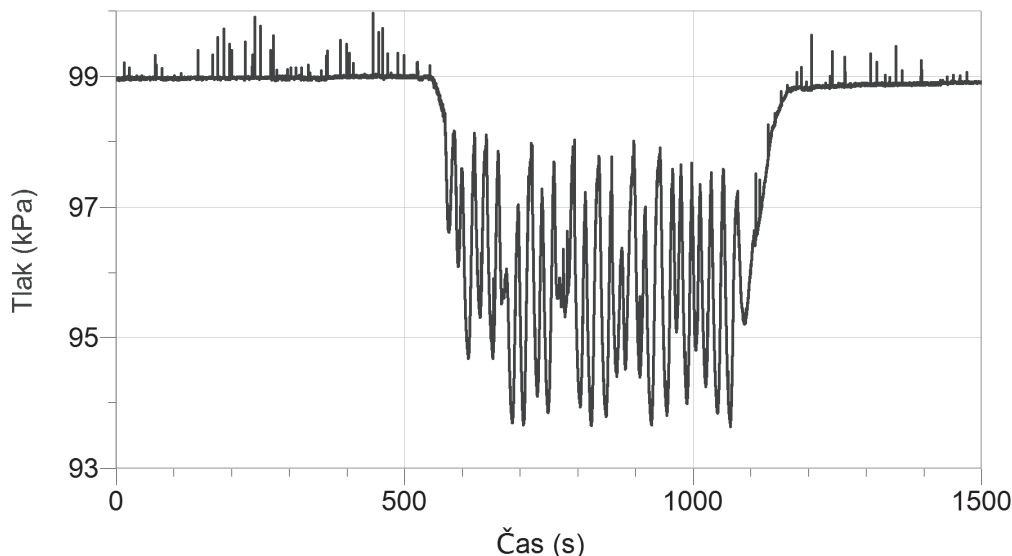
Obr. 2. Záznam tepové frekvence.

Tlak vzduchu

Tlak vzduchu jsme měřili barometrem [3] umístěným v kokpitu letadla. GPS moduly obecně nedávají při měření výšky příliš dobré informace. Typická neurčitost bývá několikanásobně horší než při horizontálním měření, což vyplývá z nepříznivých pozorovacích úhlů jednotlivých družic. Proto jsme chtěli změny výšky sledovat právě s pomocí barometru.

Vzhledem k tomu, že tlak se poměrně rychle mění i s počasím, udělali jsme korekci na tuto změnu za předpokladu lineární změny tlaku během desetiminutového letu. Jinak by totiž tlak po přistání byl jiný než před vzletnutím a z pohledu přepočtu na výšku by se zdálo, že letadlo přistálo několik metrů nad zemí nebo několik metrů pod zemí.

Korekci na změnu tlaku vyvolanou obtékáním vzduchu kolem letadla jsme nedělali, protože si nejsme jisti, jak ji přesně provést. Původní představa, že půjde využít Bernoulliho rovnici, se ukázala jako příliš optimistická. Výsledkem je, že z pohledu dat o tlaku vzduchu se zdá, že letadlo letící těsně nad zemí (cca 5 metrů) je už ve výšce několik desítek metrů. Výšková data proto bereme „méně vážně“ v tom smyslu, že určitě nedávají výšku s přesností na metry. Rozhodně ale pomohou určit, že letadlo letí rovně, prudce klesá nebo prudce stoupá.



Obr. 3. Tlak vzduchu v kokpitu.

První část grafu na obrázku 3 (zhruba do času 600 sekund) odpovídá čekání letadla na start. Následuje desetiminutová akrobatická sestava plná prudkých změn výšky a nakonec je v grafu zachyceno přistání a zastavení letadla.

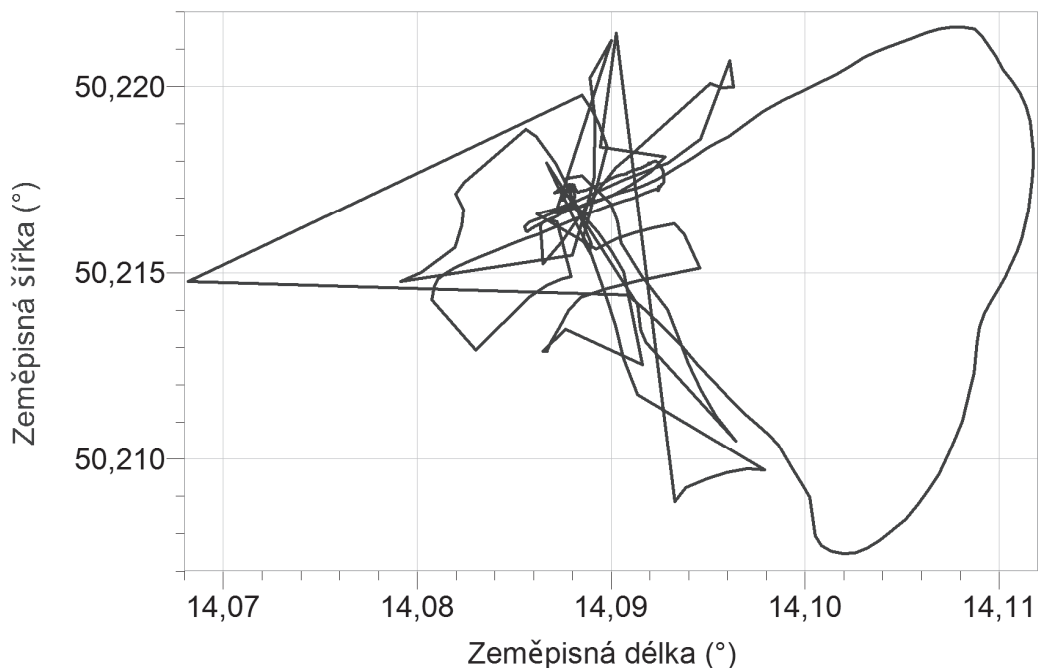
Data z GPS modulu

GPS modul integrovaný v dataloggeru LabQuest 2 [1] byl umístěn v kokpitu letadla. Bohužel kdykoliv bylo letadlo během akrobatické sestavy hlavou dolů, GPS modul „neviděl na oblohu“ a v datech se to projevilo skokovou změnou polohy.

Přesto jsou data z GPS velice zajímavá a dají se pěkně vizualizovat v programu Vernier Logger Pro [5]. Na obrázku 4 je hezky vidět trajektorie letadla nad letištěm a v jeho okolí a také krásný mohutný oblouk při přistávání.

Program Logger Pro umožňuje zpětné přehrávání dat. Můžeme tedy nechat grafy (trajektorii, tlak, tep a podobně) postupně vykreslovat, a to v reálném čase, zpomaleně nebo zrychleně.

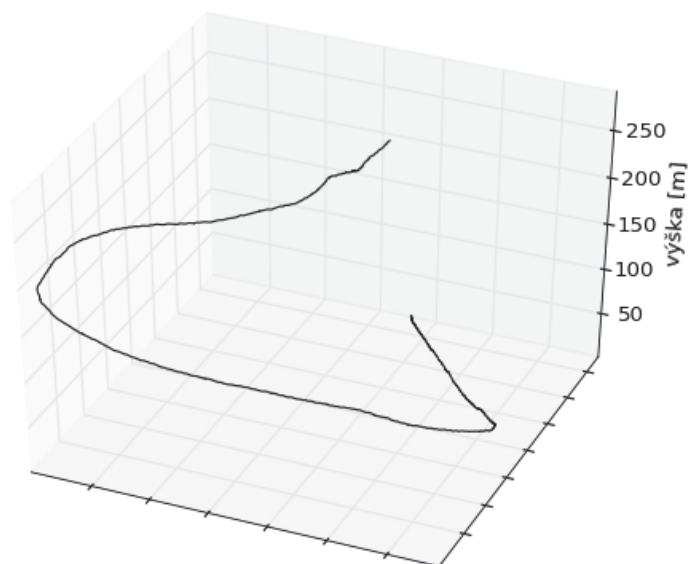
Data lze též vyexportovat do Google Maps, takže vidíme trajektorii na reálném mapovém podkladu. Dříve (ještě v části roku 2012) Google umožňoval zobrazit ve svých mapách prakticky neomezené množství dat, například deset tisíc záznamů polohy, rychlosti, okamžitého hluku a teploty atd. To umožňovalo jít terénem (nebo třeba městem) a každou sekundu automatizovaně změřit pomocí LabQuestu příslušné údaje a polohu, kde byly naměřeny – a pak celou procházku včetně naměřených dat zobrazit v mapě. Zdá se, že před nedávnou dobou Google změnil svoji politiku a aktuálně umožňuje najednou zobrazit do mapy jen několik málo stovek dat, což stačí například biologům pro terénní měření, ale pro trajektorii pohybu je to nedostatečné. Budeme tuto věc nadále zkoumat.



Obr. 4. 2D trajektorie letu získaná pomocí GPS modulu v LabQuestu 2.

3D trajektorie pohybu letadla

Protože máme data (i když zatížená určitými chybami) o poloze (z GPS) i výšce (z barometru), můžeme sestavit také trojrozměrný model trajektorie akrobatického letu.



Obr. 5. Trojrozměrná trajektorie pohybu letadla.

Na obrázku 5 je ukázka 3D grafu, který vytvořil v Pythonu student Gymnázia PORG Libeň David Roesel. V Davidově programu lze pohyb animovat a také s grafem libovolně otáčet. Zde je zachycena poslední část letu s velkým obloukem okolo letiště.

Některá zajímavá čísla

Při startu trvalo zrychlení z 0 na 200 km/h pouhých 20 s při zrychlení 3 m/s^2 a celkové uražené dráze cca 650 m.

Maximální rychlost stoupaní byla 30 m/s.

Maximální přetížení při otočce bylo okolo 5 g (člověk váží $5 \times$ víc).

Celá sestava trvala okolo 10 minut a bylo při ní spotřebováno okolo 20 litrů paliva.

Maximální dosažená výška při jedné ze sestav byla pouhých 400 až 500 m.

Rychlost při přistávání byla cca 150 km/h. Rychlost klesání při přistávání je asi 2 m/s.

Pokračování projektu

Máme přislíbeno, že budeme moci provést ještě jedno měření. Rádi bychom se podruhé vyhnuli některým chybám a získali ještě lepší data a lepší podklady pro video. Vše bychom pak rádi uveřejnili, například na www.fyzweb.cz.

Kde získat data a video

Video pořídila Lucie Filipenská (lucie.filipenska@mff.cuni.cz). O pořizování dat systémem Vernier se staral Pavel Böhm (pavel.bohm@mff.cuni.cz). V případě zájmu o data a video tedy můžete napsat na některou z výše uvedených e-mailových adres.

Poděkování

Děkujeme panu Petru Kořínkovi a panu Miroslavu „Evženovi“ Čihákovi, bez jejichž nadšení a ochoty by tento příspěvek nemohl vzniknout.

Děkujeme také Střední škole automobilní a informatiky, Weilova 1270/4, Praha za zapůjčení bezdrátového měřiče tepové frekvence Vernier EHR-BTA.

Literatura

- [1] <http://www.vernier.cz/LABQ2>
- [2] <http://www.vernier.cz/ACC-BTA>
- [3] <http://www.vernier.cz/BAR-BTA>
- [4] <http://www.vernier.cz/EHR-BTA>
- [5] <http://www.vernier.cz/LP>