

Nagy András¹

MÉRŐRENDSZER SIKLÓERNYŐK REPÜLÉSDINAMIKAI VIZSGÁLATÁHOZ²

E cikkben a siklóernyők fordulási képességének vizsgálatára alkalmas mérőrendszer kívánok bemutatni. A fordulók elemzéséhez alapvető fontosságú a repülési nyomvonal utólagos feldolgozás céljából történő rögzítése. A mérőrendszer további mért jellemzői a jobb és a bal félszárnynon keletkező légerő, amelyek a jobb, illetve a bal oldali bekötő karabinerre ragasztott nyúlásmérő bélyeg segítségével biztosítható. Ezzel a rendszerrel meghatározható a fordulókör sugara és a két félszárny közötti erőkülönbség, így vizsgálható azok összefüggése. A teljes mérőrendszer tervezése, gyártása és kalibrálása a Tanszék elektronikai laboratóriumában történt. A mérőrendszert eddig 6 repülés során teszteltük és alkalmaztuk. E repülések alatt rögzített és kiértékelt adatok is ismertetem az alább cikkben.

MEASURING SYSTEM FOR INVESTIGATE FLIGHT DYNAMICS OF PARAGLIDERS

In this paper a measuring system is presented for in-flight measuring the turning ability of paragliders. In order to analyse these behaviours, the flight track (among others) has to be recorded for post processing purposes. The measuring system presented here records other additional data like the force developed on left and right wing separately. These forces are measured based on strain gauges installed on left and right karabiner. With parameters measured it is possible to determine the relation between force difference and turning radius. The whole system has been designed, manufactured and calibrated in the laboratory of the Department of Aircraft and Ships. The system has been tested and applied in several flights and proved its operational capability.

BEVEZETÉS

A siklóernyőzés mára igen elterjedt sportrepülési ágazattá vált. Minden évben, nagyszámban képez pilótát Magyarországon a több mint 60 regisztrált siklóernyős iskola [2]. A sportág gyors fejlődését az egyre nagyobb erőforrásokat igénylő fejlesztések tették lehetővé, egy mai modern siklóernyő repülési jellemzőiben inkább hasonlít sárkányrepülőgépre, mint ejtőernyőre. A repülésdinamikai vizsgálatok keretén belül meghatározhatóak a hossz-, kereszt-, és függőleges tengely menti mozgások, statikai és dinamikai stabilitások. Ezen, a merevszárnyú repülőgépek vizsgálatára elterjedten módszereken kívül siklóernyőknél vizsgálható a szárny alakstabilitása is.

SIKLÓERNYŐK REPÜLÉSDINAMIKAI SAJÁTOSSÁGAI

A siklóernyők repülésdinamikai és stabilitási szempontból speciális légitárművek. Sajátossága többek között abból adódik, hogy a szerkezet súlypontja mélyen a szárny alatt van, így stabili-

¹ Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Repülőgépek és Hajók Tanszék, nagy@rht.bme.hu

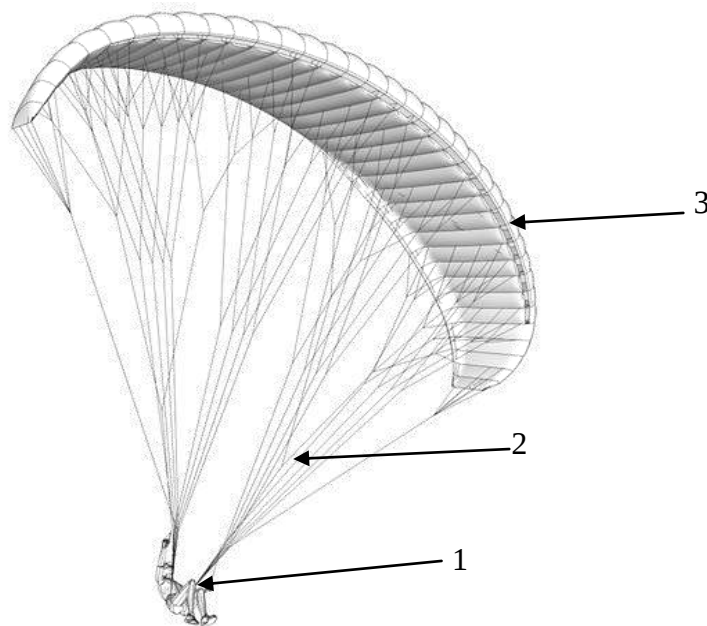
² Lektorálta: Dr. Óvári Gyula, egyetemi tanár, Nemzeti Közszolgálati Egyetem Katonai Repülő és Légvédelmi Tanszék, ovari.gyula@uni-nke.hu

tása igen nagy mértékű.

A siklóernyők szerkezete alapvetően az alábbi részekre bontható (1. ábra):

1. beülőben helyet foglaló pilóta;
2. zsinórzat;
3. kupola (szárny).

Típustól függően a teljes repülőtömeg 85-90%-át a pilóta és a beülő tömege teszi ki, ezért a rendszer súlypontja közel helyezkedik el a pilótához. A kupola tömege tipikusan 3÷6 kg, a zsinóroké 2-3 kg. Látható, hogy a kis felületű, nagy tömegű pilótából és a kis tömegű, nagy felületű kupolából álló, kéttömegű rendszer tulajdonságai határozzák meg a siklóernyő mozgásdinamikáját.



1. ábra Siklóernyő fő részei

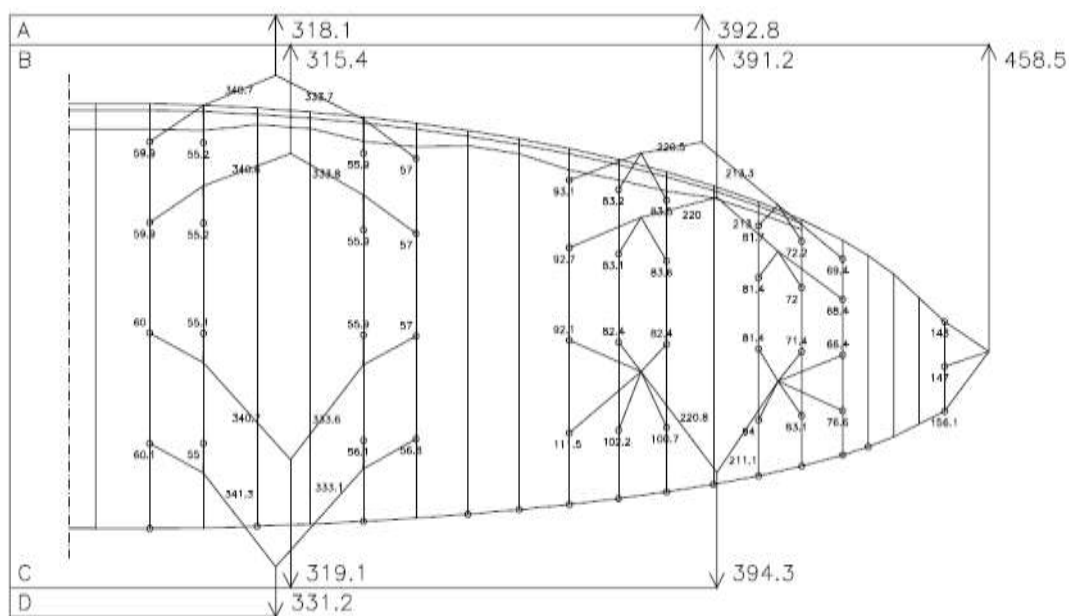
A siklóernyő kupolája hajlékony szárny, az anyag csillapítása szinte minden vizsgálatban elhanyagolható, nyúlása (ahogy a zsinóroké is) viszonylag nagymértékű, időben a mechanikai és egyéb igénybevételek (legfőképpen az UV sugárzás) hatására megnyúlásuk növekszik és maradó alakváltozást is szenvednek (öregedés). A zsinórok egyenlőtlen maradó megnyúlása azt eredményezi, hogy a kupola (szárny) tervezett és bevizsgált, valós geometriai jellemzői marandóan változnak, a siklóernyők repülési tulajdonságai ettől kezdve nem ismertek. Az éves műszaki ellenőrzésük, biztonsági felülvizsgálatuk ezen egyenlőtlen megnyúlások felkutatására irányulnak amellet, vizsgálva egyúttal a kupolák anyagának légáteresztő képességét is.

A kupola alakját döntően befolyásolja:

- annak profilja, belső szerkezete, terjedtség menti geometriája;
- a zsinórok hossza és a belőlük létrehozott rendszer felépítése;
- a kupolán keletkező légerők nagysága, eloszlása;
- a pilóta fékező és egyéb zsinórok húzásával történő beavatkozása.

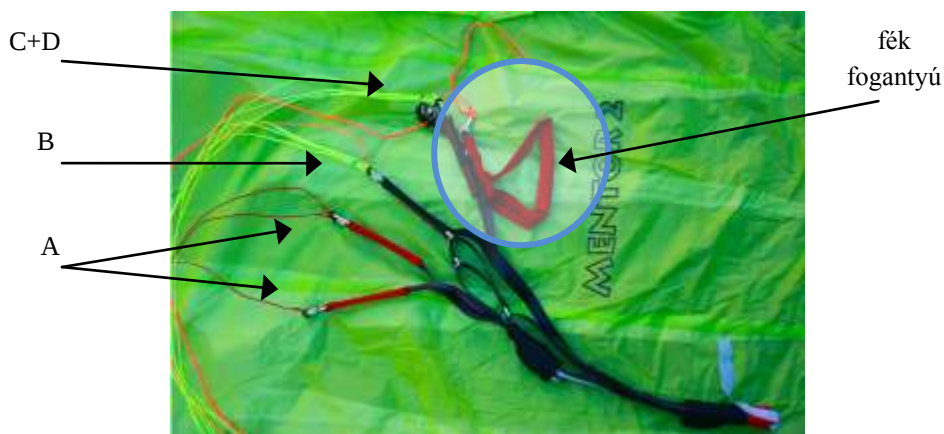
A 2. ábrán látható egy tipikus gyári, kedvtelési célú siklóernyő, tervezett zsinórelrendezése. Az ábrán a kiterített kupola alaprajza, a zsinórbekötési helyek távolságai és az egyes zsinórok

hossza látható, minden geometriai méret mm-ben van megadva.



2. ábra „Nova Rookie S” típusú siklóernyő zsinórterve

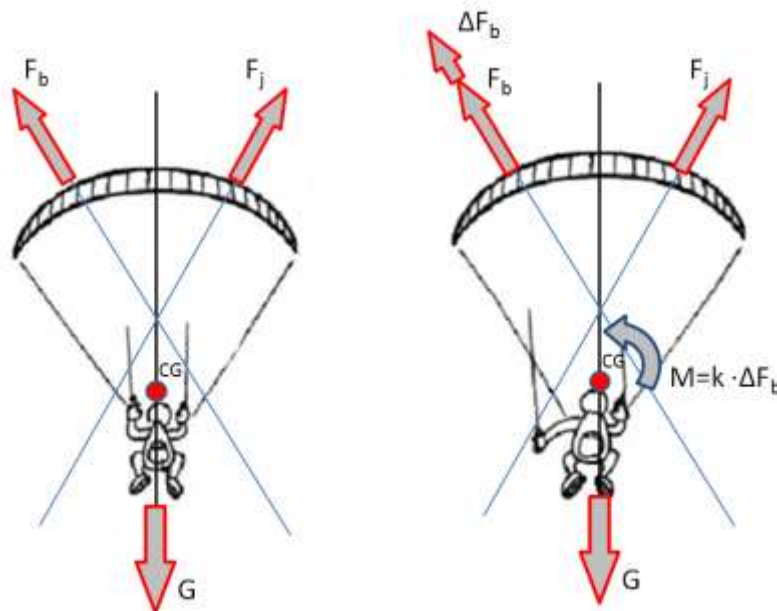
Megfigyelhető, hogy a zsinórokat a húr mentén sorokba rendezték, az egyes zsinórsorokon belül több közösítésen keresztül jutnak le a jobb és a bal főhevederekig, amiket a pilóta beülő-jéhez rögzítettek. Ezeket a zsinórsorokat a belépőél felől az ABC betűivel jelölik, tehát az első zsinórsor az A-sor, a második a B-sor, és így tovább. A kilépőélhez kapcsolódó zsinórsor (a 2. ábrán nem látható) a jobb és bal oldali fékzsinórban egyesül, ami a fékfogantyún keresztül kapcsolódik a pilótához. Utóbbi lehúzása segítségével irányítható a siklóernyő (3. ábra).



3. ábra Tipikus siklóernyő heveder (Nova Mentor 2)

A siklóernyők kormányzása két módon lehetséges: súlypont áthelyezéssel (i), ekkor a pilóta a beülőben a kívánt irányú fordulónak megfelelő oldalra kidől, így az egyik félszárnyat jobban terhelve valósítja meg a fordulót, vagy a fékzsinórok húzásával (ii), aszimmetrikusan deformálja a kupolát (annak kilépőélét), amely így a rajta keletkező légerők és az azok által okozott nyomatékok hatására fordulóba kezd. A kétféle fordulási módszert általában együtt alkalmazzák, tehát a fékzsinór húzásával együtt a megfelelő oldalra ki is dőlnek a pilóták, így vezetik fordulóba a rendszert. A siklóernyő, egyik oldali fékfogantyújának lehúzására adott válasza első pillantásra eltér attól, amit várnánk. Pl. a bal oldali fékzsinór meghúzásával a bal félszárnyon a

kilépőél lefelé tér ki (típustól függően a felszárny kilépőélének ~70% - 80%-a vesz részt ebben) így a bal felszárnyon megnövekszik a felhajtóerő. Ennek eredményeképpen mégis a bal felszárny süllyed le és bal fordulóba kezd a siklóernyő. A jelenség magyarázatához tekintsük a 4/a ábrán látható egyenes vonalú, egyenletes siklási állapot egyszerűsített erőviszonyát.



4. ábra Siklóernyő kormányzásának erőviszonyai

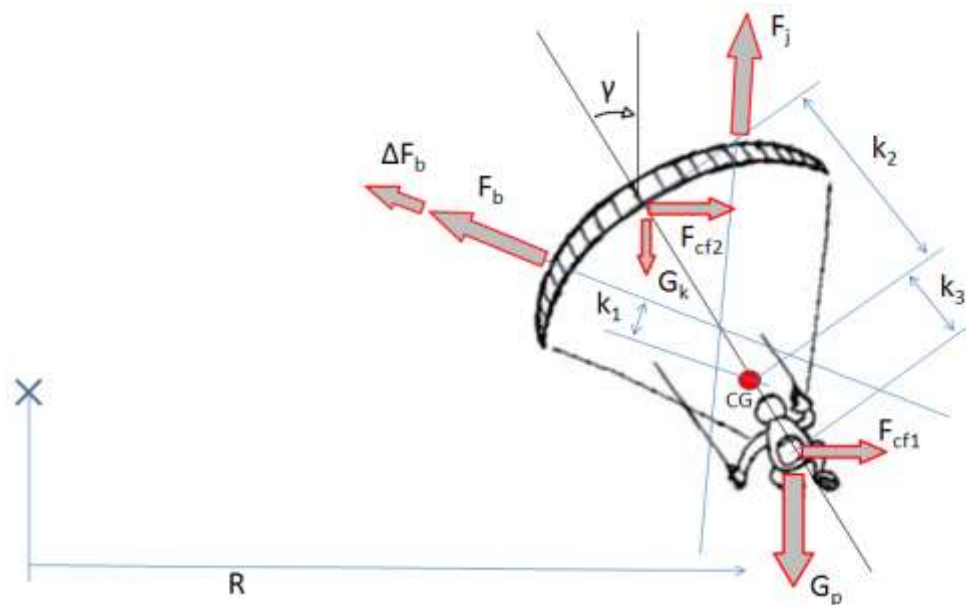
Látható az ábrán, hogy a pilóta súlyerejét a kupola két felén keletkező légerők függőleges irányú komponense ellensúlyozza. (Megjegyzendő, hogy a légerők vízszintes irányú komponense igen fontos szerepet tölt be a kupola alakstabilitásának biztosításában, amely tárgyalása nem témája jelen cikknek.) Ha ekkor a pilóta a bal oldali fékzsinór lehúzásával a bal felszárnyon megnöveli a keletkező légerők nagyságát (4/b ábra), az a súlypont körül balra forgató nyomatékot generál, így a siklóernyő balra bedöntve, bal fordulóba kezd. A fordulóba vitelt elősegíti a bal felszárnyon keletkező többlet ellenállás erő is, amit a 4. ábra nézetén nem lehet ábrázolni. A forduló közben a többi légijárműhöz hasonlóan, romlanak a siklási jellemzők. A fordulóba billentő nyomaték nagysága függ a kupola terjedtség menti íveltségétől, kvázi a V beállítás szögétől. Kis íveltségű kupola esetén, a felszárnyakon keletkező eredő légerők hatásvonala nem keresztezi egymást a súlypont fölött. Ekkor az erőkülönbségből keletkező nyomaték, ellenkező irányú bedöntést generálna. A siklóernyők kormányozhatóságának mértéke tehát a kupola íveltségétől nagymértékben függ. Az is látható, hogy a siklóernyő külső kormánysszerve egyesített csűrő+fékszárny (flaperon) funkciókat lát el [1], azok mozgatásához a pilóta mindkét kezére folyamatosan szükség van.

Az aszimmetrikus szárnytorzítással (egyik oldali fék lehúzásával) fordulóban tartott siklóernyő spirális mozgásba kezd. Ekkor a megnövekvő sebesség és az áramlási viszonyok hatására előfordulhat a kupola felületén kialakuló légerők olyan irányú átrendeződése, hogy az erők stabilan, neutrális helyzetben tartják a rendszert. Ebben az állapotban a siklóernyőt a spirálból nem lehet kivezetni, illetve olyan mértékű erőre lenne szükség a külső oldali fék húzásához, amit a pilóta nem képes kifejteni. Ez a jelenség sok baleset okozója volt a múltban, ezért a gyártók siklóernyőikre megadják a spirálban engedélyezett süllyedési sebesség maximumát,

aminek átlépése veszélyezteti a légijármű (és pilótája) biztonságát.

A siklóernyőnek, mint minden repülő eszköznek 3 tengely körüli kormányozhatósága vizsgálható, de a repülőgépekénél értelmezett kereszttengety körüli kormányozhatóság a siklóernyőknél hiányzik, mivel kizárólag a siklóernyő haladási iránya és sebességének nagysága szabályozható. Repülésdinamikai szempontból többek között ezért is egyedülálló repülőszerkezet, hiszen a magasságkontroll hiánya egyetlen más aerodinamikus légijárműre sem jellemző (sőt, a kereszttengety körüli kormányozhatóság alapvető és kulcsfontosságú). Megjegyzendő, hogy a segédmotorral ellátott siklóernyő hosszdinamikája fontos vizsgálati téma. [3][4]

Siklóernyők kormányozhatóságának vizsgálatához [6] tekintsük az 5. ábrát, amin az R sugarú, állandó γ bedöntésű fordulóban lévő siklóernyőre az egyszerűsített modell alapján ható erők láthatók.



5. ábra Siklóernyő állandó bedöntésű fordulójának erőviszonyai

A modellben a kupolának és a pilótának is van tömege, a repülőgép súlypontjától a kupola súlypontja k_2 , a pilóta súlypontja k_3 távolságra van. A repülőgép súlypontjára számított nyomatéknak zérusnak kell lennie, ez a stabil, állandó bedöntésű és sebességű forduló feltétele. Ez az egyszerűsített modell tehát alapvetően két tömegpont merev, tömeg nélküli rúddal történő összekapcsolásával került felépítésre.

A súlypontra (CG) felírt nyomatéki egyenlet:

$$-M_{\Delta F_b} - M_{F_{cf1}} + M_{F_{cf2}} + M_{G_p} - M_{G_k} = 0 \quad (1)$$

Ebben az egyes tagok kifejezése után:

$$\begin{aligned} -\Delta F_b \cdot k_1 - \frac{G_p}{g} \cdot \frac{v^2}{R} \cdot k_3 \cdot \cos(\gamma) + \frac{G_k}{g} \cdot \frac{v^2}{R} \cdot k_2 \cdot \cos(\gamma) + \\ G_p \cdot \sin(\gamma) \cdot k_3 - G_k \cdot \sin(\gamma) \cdot k_2 = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

ahol:

- k_1 - a felszárnyon keletkező légerő hatásvonalának távolsága a repülőgép súlypontjától;
- k_2 - a kupola súlypontjának távolsága a repülőgép súlypontjától;

k_3 - a pilóta súlypontjának távolsága a repülőgép súlypontjától;
 G_p - a pilóta tömege;
 G_k - a kupola tömege;
 g - gravitációs gyorsulás;
 v - levegőhöz viszonyított repülési sebesség;
 R - fordulókör sugara;
 γ - bedöntési szög.

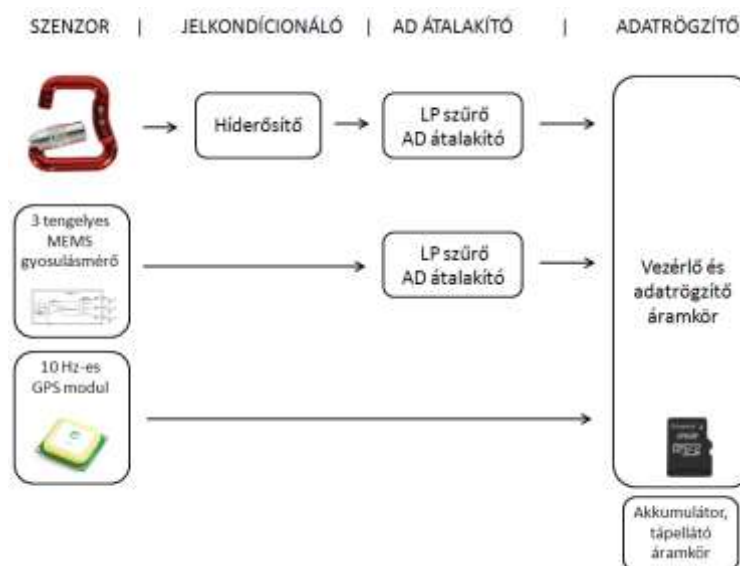
A (2) egyenletből a k_1 értékének meghatározásához ismernünk kell a többi ismeretlen értékét, így számítható a légerők hatásvonalának metszéspontja és a repülőgép súlypontjának távolsága. Ez, az előzőekben részletezettek szerint nagyban befolyásolja a siklóernyő kormányozhatóságát. A mérési feladatra egy egyedi mérőrendszer került megépítésre, tesztelésre és kalibrálásra a Tanszék elektronikai laboratóriumában.

MÉRŐRENDSZER BEMUTATÁSA

A mérőrendszer feladata, a (2) egyenletben lévő ismeretlen tényezők meghatározása. Ezen értékek:

- ΔF_b - a siklóernyő két félszárnyán keletkező felhajtóerő különbsége
- v - repülési sebesség
- R - fordulókör sugara
- γ - bedöntési szög

A mérőrendszer kialakítása lehetővé teszi ezen értékek mérését, vagy a mérési adatok alapján történő közvetett meghatározását, blokkvázlata a 6. ábrán látható. A felhajtóerő különbség meghatározásához mérni kell a félszárnyakon keletkező erőket. Ebből a szempontból a siklóernyő viszonylag könnyen mérhető, hiszen a jobb és bal oldali félszárnytól lekövető zsinórzat a pilótánál a jobb és bal oldali hevederekben egyesül, amelyek a pilóta beülőjéhez a mindkét oldalon elhelyezett 1-1 karabinerrel kapcsolódnak (7. ábra). A mérés a hevederekben lévő erők, karabiner segítségével történő mérésén alapul.



6. ábra Mérőrendszer blokkvázlata

Az alkalmazott GIN gyártmányú karabiner jellegzetes siklóernyő tartozék (7. ábra), melynek alsó részét úgy alakították ki, hogy a beülő hevederei minél nagyobb felületen, gyűrődés nélkül feküdjenek fel, a felső részén pedig a siklóernyő hevedere teljes hosszban feküdjön fel.



7. ábra Siklóernyő felépítése



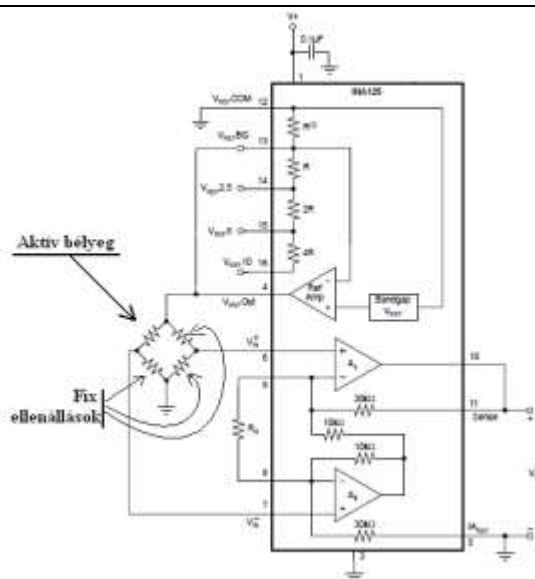
8. ábra GIN gyártmányú siklóernyős karabinerek

A gyári karabinert elő kellett készíteni úgy, hogy alkalmas legyen nyúlásmérő bélyeg felragasztására, ami a 9. ábrán látható módon történ. Az alkalmazott bélyeg KYOWA gyártmányú KFC-2-C1-11 típusú, 120 Ω névleges ellenállású, 1 db 2 mm hosszú érzékelőhálót tartalmaz és alumíniumhoz hőmérsékletkompenzált.



9. ábra Karabinerre felragasztott nyúlásmérő bélyeg és forrasztási terminál

A bélyeg felragasztásához mechanikai úton el lett távolítva a karabiner színes eloxált bevonata, így a fém tiszta és zsírmentes alapanyagra történt az installálás. Ezután folyékony ragasztóval védőbevonatot kapott a bélyeg a mechanikai terhelések ellen, majd az elvezető huzalokat is rögzítettük, a 9. ábrán látható módon.



10. ábra Nyúlásmérő belyeg Wheatstone hídjának és híderősítőjének kapcsolási rajza

A belyeg elektromos bekötése egy 1 aktív belyeget tartalmazó mérőhídba történt (10. ábra), melynek passzív része precíziós fix értékű ellenállásokból épült fel. A híd által szolgáltatott jel erősítését INA 125 típusú műszererősítő, IC segítségével biztosította. [5] Utóbbi egy $\pm 0.15\%$ pontosságú feszültségreferencia áramkört tartalmaz, ami a mérőhíd táplálására felhasználható. Az érzékelő mérőhíd és híderősítő áramkörének NYÁK terve és a legyártott áramkör a 11. ábrán látható.

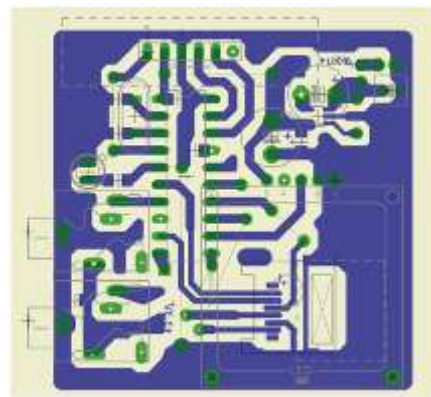


11. ábra A megvalósított erőmérő egység és NYÁK terve

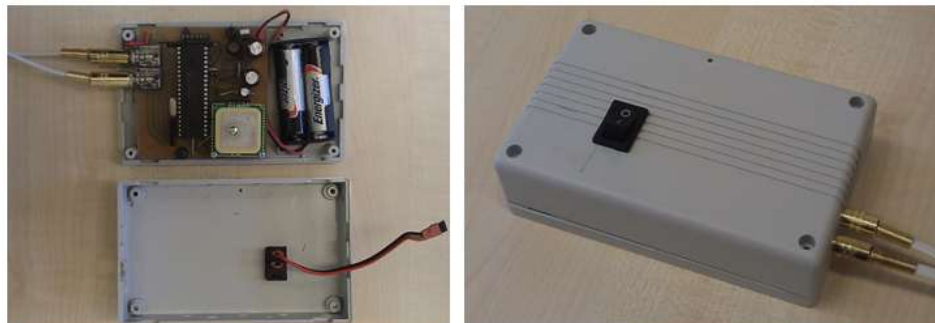
A repülési sebesség és a forduló sugarának meghatározásához egy 10 Hz-es GPS modult építettünk be, amely a pozícióadatokat, sebességet és magasságot szolgáltat digitális, soros vonalon keresztül. Így konverzióra nincs szükség, az adatrögzítő egység direkt módon kapja a rögzítendő adatokat. A GPS modul a LOCOSYS Technology által gyártott LS20030 típus, 10 Hz-es 66 csatornás egység, beépített nagy nyereségű GPS antennával.

A bedöntési szög meghatározása a nehézségi gyorsulás irányának mérésével történt. A gyorsulásmérő az ADXL335 típusú, 3 tengelyes MEMS szenzor, beépített jelkondicionáló áramkörrel. A 3 tengely menti gyorsulással arányos analóg kimeneteit egy-egy alul áteresztő szűrő közbeiktatásával közvetlenül az adatgyűjtő egység A/D átalakítójára lehet vezetni, nincs szükség külön jelkondicionálásra vagy illesztésre.

Az adatgyűjtő és rögzítő egység vezérli és szinkronizálja az adatgyűjtést, melyeket egy mikroSD kártyára rögzít. Utóbbi nem hoz létre fájlrendszert, direkt módon írja az egyes szektorokat. Így a kártyára írás gyorsabban megy végbe, áramkimaradás vagy bármilyen zavar hatására bekövetkező adatvesztés csak az aktuálisan írt szektort érinti, az összes addig rögzített információ sértetlen marad. Ez a limitált mérő- és tesztrepülések számát figyelembe véve igen fontos tulajdonság. Az alkalmazott SD kártya és akkumulátor kapacitás lehetővé teszi, hogy folyamatosan ~14 órát működjön a mérőrendszer, ami a 10 Hz-es adatrögzítési frekvenciát figyelembe véve ~500.000 rögzített mérési pontot jelent. A megépített adatrögzítő rendszer egy dobozba rögzítettük (13. ábra), mely tartalmaz egy nyomógombot, amivel a rögzített adatsorba jelöléseket lehet elhelyezni, így nyomon követhetőek a mérések egyes szakaszai, az utólagos adatfeldolgozás egyszerűsödik. A 12. ábrán látható az adatgyűjtő egység NYÁK terve.

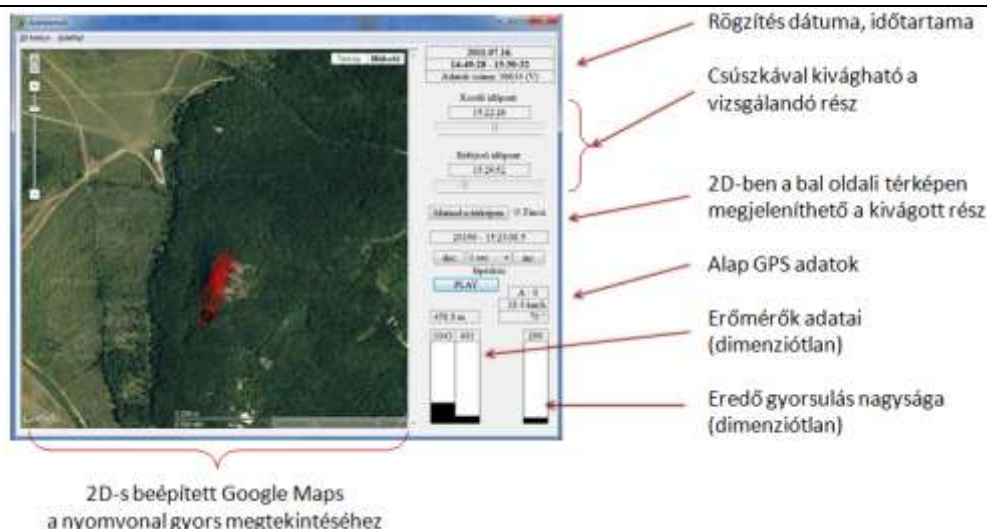


12. ábra Adatgyűjtő egység NYÁK terve

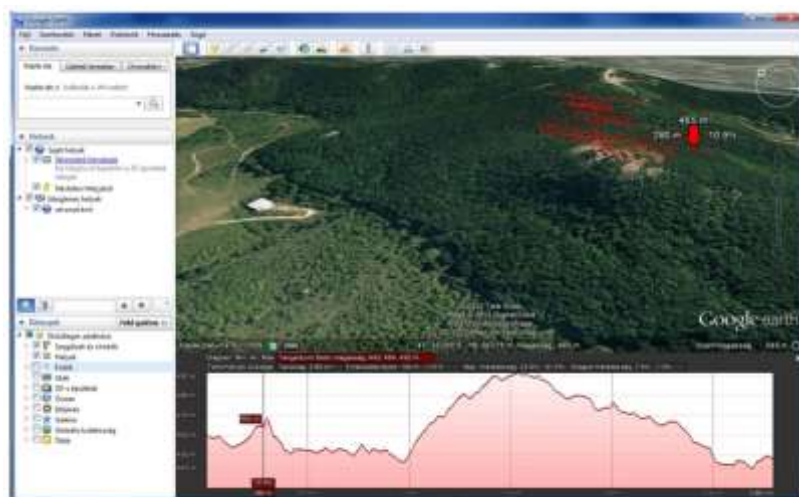


13. ábra A megépített mérőrendszer dobozba építve

Az SD kártyára történő szektoronkénti rögzítés miatt PC-vel közvetlenül nem olvasható ki az elmentett adat (hiszen nincs fájlrendszer). Az adatok egy saját fejlesztésű szoftver (14. ábra) segítségével nyerhetőek ki és exportálhatóak excel táblázatba, ahol a kiértékelés megtörténhet. Lehetőség van az adatok programon belüli előzetes értékelésére és arra is, hogy a rögzített nyomvonalat '.kml' kiterjesztésű fájlba exportáljuk, amit a Google Earth nevű programmal meg lehet nyitni és elemezni 3 dimenzióban (15. ábra).



14. ábra Szoftver az adatok kiolvasásához és exportálásához



15. ábra Tesztrepülésen rögzített nyomvonal exportálva kml fájlba és megnyitva Google Earth programmal

MÉRŐRENDSZER KALIBRÁLÁSA, TESZTELÉSE, MÉRÉSI EREDMÉNYEK

Az erőmérő teszthei és kalibrációi során bebizonyosodott, hogy a karabineren mért megnyúlás nem csak a karabinert terhelő erő nagyságától, hanem támadási pontjától is függ. Ezt szemlélteti a 16. ábra, a repülés alatt a siklóernyő hevederjének helyzete és ezzel a karabiner terhelése folyamatosan változik. A változás eltolódás (t) és elfordulás (β) formájában jelentkezik, és nagyban függ a pilóta testhelyzetétől és mozgásától. Ezen hatások miatt a karabineren mért megnyúlás arányos ugyan a terhelőerő nagyságával, de az arányossági tényező a mérés alatt folyamatosan változik. Így abszolút módon nem lehet meghatározni a terhelőerők nagyságát.



16. ábra Karabinerre ható erők változása

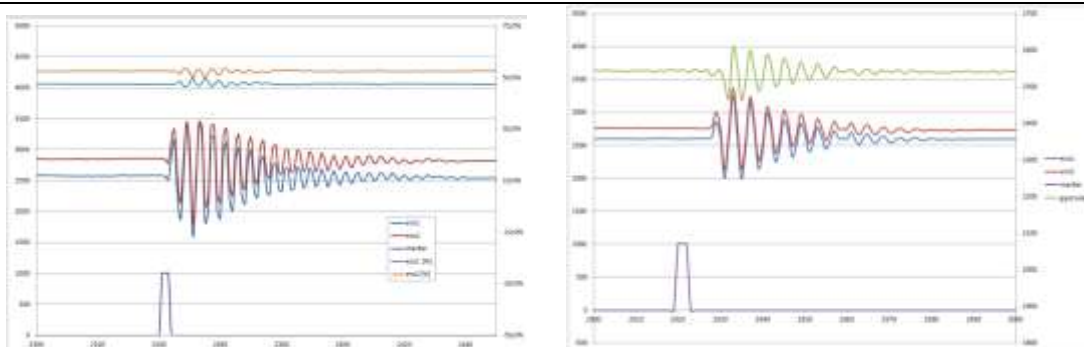
A probléma kiküszöbölhető az utólagos adatfeldolgozás során. A kétoldali karabineren keletkező megnyúlás által adott jel összege mindig a pilóta tömege és az aktuális terhelési többes szerinti nehézségi gyorsulás szorzatával arányos. Így a két oldalon mért értékek összegét mindig a pilóta súlyerejéhez viszonyítva lehet megadni százalékosan, így a két erő különbségének meghatározása elvégezhető.

Az adatrögzítő első tesztjein egy acél zártszelvény tartóra került a beülő felfüggesztésre (17. ábra). A teszt során impulzusszerű terheléssel terheltük a beülőt, a zártszelvény tartórúd ennek hatására csillapodó lengésbe jött.



17. ábra Mérőrendszer tesztjének sematikus rajza

A lengés időbeni lefolyása, lecsengése a 18. ábrán látható, a vízszintes tengelyen az időlépés (1/10 mp), a függőleges tengelyen az AD átalakító nyers adata került ábrázolásra. Az $ero1$ és $ero2$ %-os mennyiségek a jobb- és baloldali nyers adatok összegéhez viszonyított százalékos érték, aminek szimmetrikus terhelés esetén nem szabad változnia. Látható, hogy az impulzusszerű függőleges, szimmetrikus terhelés hatására a százalékos értékben mindössze 4%-nyi eltérés tapasztalható, míg a nyers adat ~1500-3500 egység közötti értékeket vesz fel, ami a ~2600 egységnyi alapjelhez képest ~75%-os változást jelent. Így az (megnyúlás és a hevederen ható erő közötti) arányossági tényező változása, ami a karabinert támadó erő irány- és erőkar változásából adódik, kellőképpen kiküszöbölhető.



18. ábra Mérőrendszer impulzus terhelésre adott teszteredménye (időtengely 14 mp)

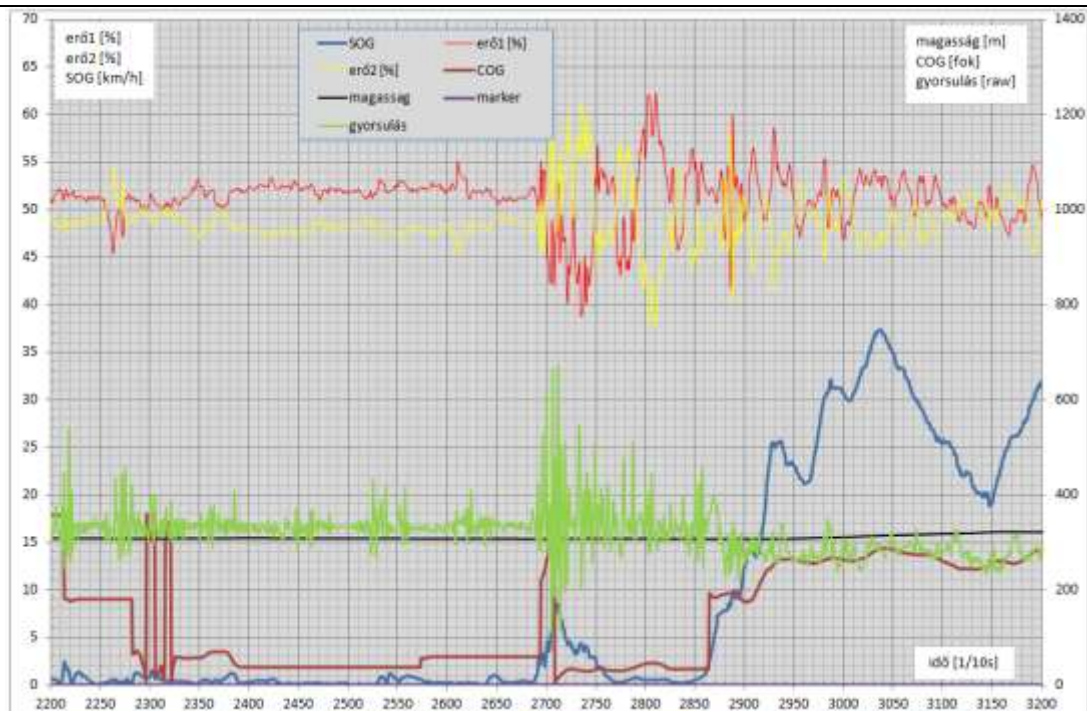
A tesztrepülések elvégzésére a mérőberendezést a siklóernyő beülőjébe rögzítettük (19. ábra). Az alkalmazott siklóernyő Nova Rookie S típusú, a mért starttömeg 91 kg. Az ernyő-pilóta távolsága (5. ábra és (2) egyenlet: k_2+k_3): 7,1 méter.

A 20. ábrán látható a felszállási folyamat során rögzített adatsor.



19. ábra Repülés közbeni mérésre előkészített mérőrendszer

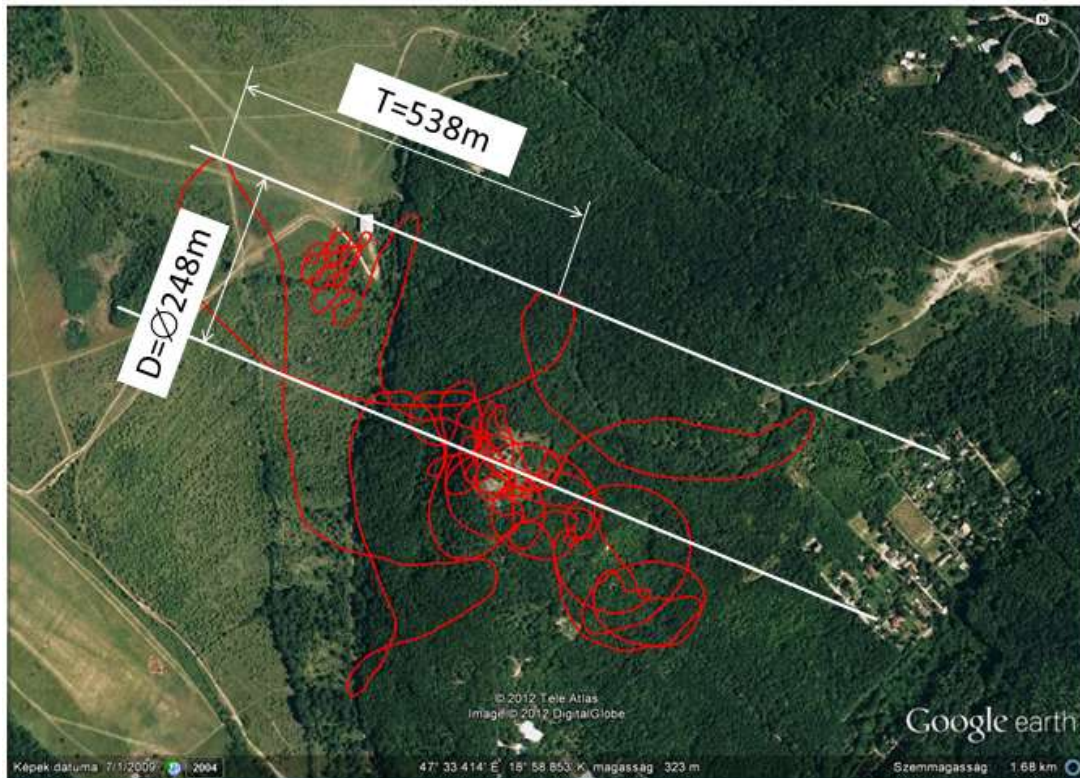
A siklóernyő felszállási folyamata során először repülésre kész állapotba kell hozni a kupolát, majd a gyorsítási szakasz után emelkedik el a földtől a pilóta. Ez a folyamat jól nyomon követhető a 20. ábrán.



20. ábra Felszállási folyamat regisztrátumának kiértékelése (időtengely 100 mp)

Látható, hogy az ernyő felhúzása, repülésre történő alkalmassá tétele a 2700. időpillanatban történik, ami az adatrögzítés kezdete óta eltelt 270. másodpercet jelent. Ekkor a gyorsulás, az erők, mind heves változásokat mutatnak. A talaj elhagyása, tehát az emelkedés kezdete a 2850. időpillanatban történik meg, látható a föld feletti sebesség növekedése, addig a kupola megtartásához szükséges sebességet a szélsősebesség adta. A gyorsítás (hagyományos repülőgépen a nekifutás) tehát nagyjából 2 mp-ig tartott, amit az aktuális szélsősebesség, a mért föld feletti sebesség és a siklóernyő minimális sebességének ismeretében lehet meghatározni.

A 21. ábrán egy mérőrepülés alkalmával rögzített nyomvonal látható, ami az elemi körmozgás (állandó bedöntésű forduló) és egy lineáris mozgás (szél) összegeként adódik. A nyomvonal alapján a fordulás sugara 124 méterben lett lemérve (átmérő fele), miközben a szél hatása miatt 538 métert tett meg a siklóernyő. Ha állandó bedöntésű fordulónak tekintjük a fordulást (amire a repülés során törekedtem is), a nyomvonalból meghatározható a szél iránya, sebessége is. Ehhez a rögzített adatsorból szélsőérték kereséssel meghatározandó a teljes forduló közben mért legkisebb és legnagyobb sebesség, amely jelen esetben 11 és 59 km/h-ra adódott. Ezen adatokból a szélsősebesség 24 km/h, iránya 277°, ami 4 km/h-val több, mint a felszállás előtt mért átlagos szélsősebesség. Az eltérés minden bizonnyal abból adódik, hogy a starthelyen földközeli szélsősebességet mértünk, a tesztrepülés pedig átlagosan 300 méterrel a talaj felett zajlott. A forduló közben a siklóernyő trimm-sebességen haladt, amely a mérési adatokból is számítható 35 km/h, és egybevág a gyártó által erre a típusra megadott értékkel.



21. ábra Mérőrepülés nyomvonalából a fordulási sugár meghatározása

A teljes fordulat ideje 97 mp volt, közben 970 adatsor került rögzítésre, az átlagolt erőkülönbség 38 N volt. A forduló során a rögzített 3 tengely menti gyorsulások átlagából a bedöntési szög 9°-ra adódott. A mért erőkülönbség hatására tehát a siklóernyő 124 méteres sugáron, 9°-os bedöntéssel és 35 km/h-s sebességgel hajtotta végre a fordulót.

Ezekkel az adatokkal a (2) egyenletből a kormányozhatóságot befolyásoló k_1 erőkar hossza

$$k_1 = 2.1 \text{ méter}$$

adódott, az alábbi konstansok használata mellett:

- $k_2 = 5,8 \text{ m}$;
- $k_3 = 1,3 \text{ m}$;
- $m_{\text{pilota}} = 86,5 \text{ kg}$;
- $m_{\text{kupola}} = 4,5 \text{ kg}$.

Így a siklóernyőt fordulóban tartó nyomaték nagysága:

$$M = \Delta F_b \cdot k_1 = 79.8 \text{ Nm}$$

Az itt meghatározott erőkarok és nyomatékok alkalmasak a siklóernyők kormányozhatóság és hossz tengely körüli stabilitás szerinti összehasonlítására. A jelen cikkben ismertetett konkrét értékek más típusú siklóernyőkkel végzett és/vagy különböző starttömegű repülések mérési eredményével történő összehasonlítása a további vizsgálatok tárgya lesz. Az eredmények további validálása több mérőrepülést igényel, a légköri és egyéb zavarok pontosabb szűrése érdekében.

A cikkben siklóernyők repülésdinamikai vizsgálatához alkalmas mérőrendszer került bemutatásra. A mérőrendszer és egy egyszerűsített hossz tengely körüli repülésdinamikai modell segítségével meghatároztuk az adott típusú siklóernyőt, meghatározott sugarú és bedöntésű fordulóban tartó nyomaték nagysága. A mérőrendszer kialakítását és kalibrálását / tesztelését is ismertettem a cikkben, a mérési eredmények és tesztrepülések adatai mellett.

A munka szakmai tartalma kapcsolódik a "Új tehetséggondozó programok és kutatások a Műegyetem tudományos műhelyeiben" c. projekt szakmai célkitűzéseinek megvalósításához. A projekt megvalósítását a TÁMOP-4.2.2.B-10/1-2010-0009 program támogatja.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] Dr. ÓVÁRI Gyula: Korszerű repülőgépek kormányvezérlése (kézirat), 2008
- [2] Magyar Szabad Repülők Szövetsége honlap és statisztikai adatai: www.hffa.hu
- [3] John R. CHAMBERS: Longitudinal dynamic modeling and control of powered parachute aircraft, 2007
- [4] ZAITSEV, P. V., FORMAL'SKIJ, A. M.: Paraglider: Mathematical model and control. Doklady Mathematics, 77(3):1–4, 2008.
- [5] Texas Instruments INA125P IC adatlap: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina125.pdf>
- [6] Olivier CALDARA: Vol Libre Magazin 307, 2002 február