



Makkay Imre¹

ELEKTROMOS HAJTÁSÚ REPÜLŐGÉPEK KONSTRUKCIÓS MEGOLDÁSAI²

Napjainkra kulcsfontosságúvá növekedett – a légi forgalom, az energiaválság, a környezetvédelem együttes hatására - a repülőgépek fedélzetén használt energiaforrás és hajtómű kérdése. A fosszilis üzemanyagok alacsony hatásfokú elégetésekor jelentős a káros anyag kibocsátás, nagy a zajterhelés – ami még a repülőterektől távol élőket is zavarja. Ma a kutatók, fejlesztők a leghőbb vágya a hatékony, tiszta, csendes repülőgép megalkotása – ezért a villamos áramot próbálják a fedélzetre vinni és ott munkára fogni.

Az írásmű – néhány jellemző példán keresztül – áttekintést nyújtva a konstrukciós megoldások lehetőségeiről inspiráló gondolatokkal kíván a hazai fejlesztésekhez hozzájárulni.

ELECTRIC AIRCRAFT CONSTRUCTIONS

Today crucial growth - the air traffic, energy crisis, the combined impact of the environment – energy use on board the aircraft and engine issues. The burning of fossil fuels in low efficiency of the significant emission and high noise – even for those who living far away from the airport - to interfere. Today, researchers, developers, the main desire for efficient, clean, quiet aero engine to create - so the electricity board to try and take it to work the gearbox to catch.

The article provides an overview of design possibilities and solutions - some typical examples presented – inspiring ideas to serve the domestic research and development efforts.

BEVEZETÉS

Amint a 2011-es „Green Flight Challenge” eredményeivel bizonyította, a villamos hajtású repülőgépek már felnőttek arra a szintre, hogy komolyan vehető teljesítmény mutathatnak – 200 mérföldet kevesebb, mint két óra alatt megtettek, miközben jóval kevesebb, mint 33,7 kW/h-t fogyasztottak egy-egy utasra számolva. Mindemellett még maradt is némi áram az akkumulátorokban – a kötelező 30 percre. [1] A hasonló megmérettetések naponta javuló teljesítményeket szolgáltatnak, ami a közlekedés szinte minden résztvevőjének valamilyen járművéig a „zöld vonal” erősödését jelzik – a fosszilis üzemanyagokkal szemben. Már nem az a kérdés, hogy lehet-e elektromos árammal táplálni a repülőgép hajtóművét, sokkal inkább az, hogy milyen alternatív – eddig elképzelhetetlen – hajtási eljárásokat lehet a fedélzeten alkalmazni. A belsőégésű motorok kihajtása hagyományosan forgó mechanizmus. Az elektromos meghajtás más mozgásformákhoz is adaptálható, mint például a lineáris, vagy lengő-billegő hajtások, de a MEMS technológiával akár a szárnyfelületeken terjedő hullámokkal is létrehozható tolóerő.

Az elektromos hajtású repülőgépek két „iskolát” képviselnek – a hagyományos meghajtó

¹ ny. okl. mk. ezds. egyetemi tanár, Nemzeti Közszolgálati Egyetem Katonai Repülő és Légvédelmi Tanszék, makkay.imre@uni-nke.hu

² Lektorálta: Dr. Óvári Gyula ny. okl. mk. alez; egyetemi tanár, Nemzeti Közszolgálati Egyetem Katonai Repülő és Légvédelmi Tanszék, ovar.gyula@uni-nke.hu

rendszerek villamosítását és a teljesen új „áram-centrikus” gondolkodás eredményeit. Az előbbi kényelmesnek tűnik és gyors sikert (vagy ellenkezőjét) ígér, a másik út viszont a jövő-kép formálását és a bátrabb fejlesztők inspirálását nyújtja a többletmunkáért cserébe.

AZ ELEKTROMOS HAJTÁSÚ REPÜLÉS ÚTTÖRŐI

Az első napelem hajtású repülőgépet Günter Rochelt professzor alkotta, amely formáját tekintve is szokatlan Canard 2FL ultrakönnnyű vitorlázó gépre épült és mindenképpen inspiráló volt a további fejlesztésekhez. 1983-ban 5 óra 41 percet töltött a levegőben.



1. kép A Solar 1 már 1981-ben napenergiával repült³

Rochelt tervezte az első sikeres, emberi erővel hajtott repülőgépet is. Ebben az „iskolában” tanulta meg az igazi könnyű szerkezetek titkát és kapott kedvet a „nappal repüléshez” a műrepülő bajnok Eric Raymond is, aki később megépítette a maga „SunSeeker”-eit. [2] A 247 mérföldes nonstop repülése egyelőre világrekord emellett a 16 600 lábás magassági rekordot is Ő tartja.



2. kép „Sunseeker II” napenergiát használó, pilótával repülő motoros vitorlázó⁴

Az Eric Raymond vezette sikeres törekvés – a nap energiáját felhasználva repülni – a „legzöldebb álmok” közé tartozik. A megoldás egyik kulcsa a hatékony nap-elektromos energia konverzió, a másik a speciálisan erre tervezett kis légellenállású sárkányszerkezet. Eric Raymond több sikeres európai túrarepüléssel [3] bizonyította, hogy a „nappal repülés” egyre közelebb kerülhet a mindennapi gyakorlathoz. A SunSeeker Team ma már a kétszemélyes változaton dolgozik, amelyben – saját fejlesztésű motorjával – részt vesz a szlovéniai Roman Sušnik is.

³ http://www.asl.ethz.ch/research/asl/skysailor/History_of_Solar_Flight.pdf

⁴ <http://www.solar-flight.com/news.html>

Roman Sušnik először vett egy APIS ultrakönnyű vitorlázót KIT-ben és 2004-ben a friedrichshafeni kiállításon – a „nagyok” mellett – megjelent a kefé motorú APIS EA1-el. Szorgalmasan dolgozott a motor továbbfejlesztésén és 2008-tól már a kefe nélküli EMRAX motorokat gyártja olyan sikerrel, hogy a „nagyok” is tőle vásárolnak. A Pipistrel gyár kétszemélyes Taurusa – a tavalyi friedrichshafeni egyik díjazott – a DG Flugzeugbau és a már a Cessna Aircraft is az Ő motorjait próbálgatja. Több európai egyetemi kutatást/fejlesztést is ellát motorokkal, ahol a hajók, autók elektromos hajtásán dolgoznak. 2012 márciusában megjelent az EMRAX_UHP motorja, amely 15 kg tömegével és 40 kW folyamatos, 120 kW rövid idejű teljesítményt tud produkálni 2200-as fordulaton – ehhez 320 V-os egyenfeszültséget kell biztosítani. A motor lég-, vagy folyadékűtéssel működik.



3. kép Roman Sušnik készíti Eric Raymond új, kétszemélyes SunSeeker-ének motorját⁵

A másik két szlovén fejlesztő Luka Žnidaršič és apja Matija Žnidaršič először FES – Front Electric Sustainer – a gép orrában működő elektromos hazatérő motorral mutatkozott be, amely egy éven belül Selflauncher – felszálló motorra fejlődött. Mindketten a modellezőként kezdtek, majd a vitorlázó repülésben szerzett több-ezer órás tapasztalat után a litván LAK-17B villamosítása hozta meg a sikert, melyet azóta az olasz Silent 2 is követett.



4. kép FES az Alisport Silent 2 orrában⁶

⁵ <http://blog.cafefoundation.org/wp-content/uploads/2010/06/Roman-with-motor.jpg>

⁶ <http://www.front-electric-sustainer.com/photo.php>

A „felnagyított modellező légcsavar” az orrkúpban sokkal kevesebb gondot okoz, mint a törzsbe rejtett társaik, amelyeket hosszas nyitogatás után lehet csak üzembe helyezni. A léglélenállás növekedés alig észlelhető – a kinn hagyott futóhoz hasonló zajnövekedést okoz. A megoldás más gépek (ASW, ASG, ASH, HPH, JS1, Schempp-Hirth) átalakításához, újak tervezéséhez is ajánlható. A teljesítménymutatók ígéretesen javulnak - ahogy a videó felvételeken látható, a Silent 2 FE(SL) már fűről is felszállt [4].

Az európai összefogással megépült „Solar Impulse” is az egyik példája a fizika és a legújabb technológia párharcának – melyben az utóbbinak kell folyamatosan javulnia. A gép szárnyfeszítávolsága megközelíti a Boeing 777 utasszállítótét (61,4 m). A mindössze egy pilótára tervezett kabin berendezése – a tömeg csökkentése érdekében – meglehetősen spártai. A fejlesztők terve, hogy 2013-14-ben, öt állomás közbeiktatásával körberepüljék a Földet.[5]



5. kép A „Solar Impulse” 2011. májusban már megtette a Brüsszel-Párizs távolságot⁷

A hatalmas lendülettel fejlődő szlovéniai Pipistrel repülőgépgyár – ahogy az alapító, Ivo Boscarol nyilatkozta – kétévi céltudatos fejlesztő munkával építette meg a Pipistrel G4 repülőgépet és ezzel megnyerte a 2011 októberében rendezett „Green Flight Challenge” versenyt. A több NASA versenyen kiválóan szereplő innovatív fejlesztő gárda merész terve – a világon először, négyüléses, villanymotorral meghajtott vitorlázó gépet építeni és ezzel az eddigi legnagyobb megmérettetésen pályázni – sikerhez vezetett. Az éppen csak szériára érett Taurus Electro két törzsét házasították és a közöttük elhelyezett – repüléstechnikában eddig példátlan teljesítményű – villamos hajtást alkalmazták. A négy pilótaülés – a fejlesztők elképzelése szerint – alkalmas a hatékony kiképzés céljára is, ahol egy oktatóval egyszerre három növendék gyakorolhat. (Ez utóbbin azért lehet vitatkozni – a szerző véleménye.)

A második helyezet eGenius a Stuttgarter Egyetem oktatói, kutatói, diákjai részvételével készült, akik egy korábbi Héliumos projekt repülőgépét alakították át akkumulátoros üzemre. A zajmérésen a verseny mindegyik döntőse a 78 dBA limit alatt teljesített. Itt a győztes az e-Genius lett 59,5 dBA értékkel és elnyerte az Eric Lindberg által alapított, a legcsendesebb repülőnek járó LEAP díjat. [6] Összehasonlításként egy ugyanilyen teljesítményű gázturbina ezen a távolságon

⁷ <http://www.aviationnews.eu/2011/05/12/1st-international-flight-by-solar-impulse/>

110 dBa-al „szól” – mintegy 16-szorosan meghaladva ezt az értéket. Az emberi fülre a levegőben a 85 dBa feletti nyomás már veszélyes lehet – az ismétlődő akár halláskárosodást okozhat.



6. kép A GFC 2011 győztese a Pipistrel G4 repülőgép⁸

Az eredmények további részletei a CAFE Foundation honlapján [7] és a szerző egy másik írásában [8] is megtalálhatók. A döntő másik két résztvevője nem tudta teljesíteni a minimális 200 pMPG⁹ követelményt – ami kizáró tényező volt. Ez utóbbi elgondolkodtató, mert azt jelenti, hogy ezt a szintet már folyékony üzemanyagú hajtóművel nem is lehet teljesíteni?

Valóban, a verseny olyan magas hatékonysági mutatókat követelt, amire csak villamos hajtások képesek. A villanymotorok közel 90%-al hasznosítják az elektromos energiát, míg a belsőégésűek legjobbjai 25% körül. A „titok” az energiahordozó tömegében van. Míg a legjobb LiFePo akkumulátorok 439 Wh/kg –ot, addig az egyszerű autóbenzin 12200 Wh/kg-ot teljesít.[9] Ha tehát elegendő akkumulátort tudunk a fedélzeten magunkkal vinni, akkor „verhetetlenek vagyunk” – hatásfokban. A GFC azt bizonyította, hogy villamos hajtású repülőgépek már felnőttek arra a szintre, hogy komolyan vehető teljesítmény mutatnak – 200 mérföldet kevesebb, mint két óra alatt megtettek, miközben jóval kevesebb, mint 33,7 kW/h-t fogyasztottak egy-egy utasra számolva. Mindemellett még maradt is némi áram az akkumulátorokban – a kötelező 30 percre.

AZ ELEKTROMOS HAJTÁS TITKAI

Az elektromos hajtás három alapvető elemből áll: energiaforrásból, szabályzó egységből és a motorból. Amint az eddigiekből láttuk, a közdelem minden fronton folyik a könnyebb és ha-

⁸ http://031c524.netsolhost.com/blog1/2011/09/18/21/img_6368

⁹ 200 pMPG – 200 mérföldet kellett megtenni úgy, hogy személyenként 1 gallon 87 oktános autóbenzinnel ekvivalens energiát lehetett elszámolni

tékonyabb megoldások irányába. Az autóiipar érdeklődése a villamos hajtások iránt számos eredményt áthoz a repülésbe is, de ott a tömeg nem jelent akkora hátrányt, mint egy légi járműnél, és a leállítás is egy forgalmi zavart okoz a legtöbb esetben. Nézzük meg sorra, milyen lehetőségeink vannak és melyek, amiket tovább kell javítanunk.

Motorok

Az erőátviteli motorok – szinte kizárólag – kefe nélküli, háromfázisú, váltakozó áramúak, melyek forgó mágneses terét a szabályzó egyenáramból állítja elő. A kivitel elég nagy változatosságot mutat, a mágneses tér irányát tekintve lehet axiális és radiális. Az axiálisból egy, vagy több tekerccsört tartalmazó, a radiálisból, pedig belső (inrunner) és külső (outrunner) mágneses gyűrűt tartalmazó fordulhat elő.



7. kép Belső- és külső mágneses gyűrűt alkalmazó radiális motor ^{10 11}

Ugyanolyan teljesítmény leadására a belső mágneses motorok jellemzően nagyobb, míg a külső mágnesesek alacsonyabb fordulatszámúak – ami összefügg a mágnesek elfordulás tengelytől mért távolságával. Így a belső mágneses motorok az impelleres (ducted fan) hajtásokra, míg a külső mágneseseket a légszavak lassú, nagy nyomatékú hajtására használják.

Az RC modellezésben radiális motorok néhány év alatt szinte teljesen kiszorították a belső égésű motorokat. A „nitros” világban a motorok indítása, üzemeltetése, gondozása külön „szakma” volt, amibe több év alatt lehetett beletanulni. A mai modellek motorjaival semmi gondja a használójának, csak „tolni kell” a potencióméteren és akár a több(tíz) kilowatt elsza- badul – szinte hangtalanul.

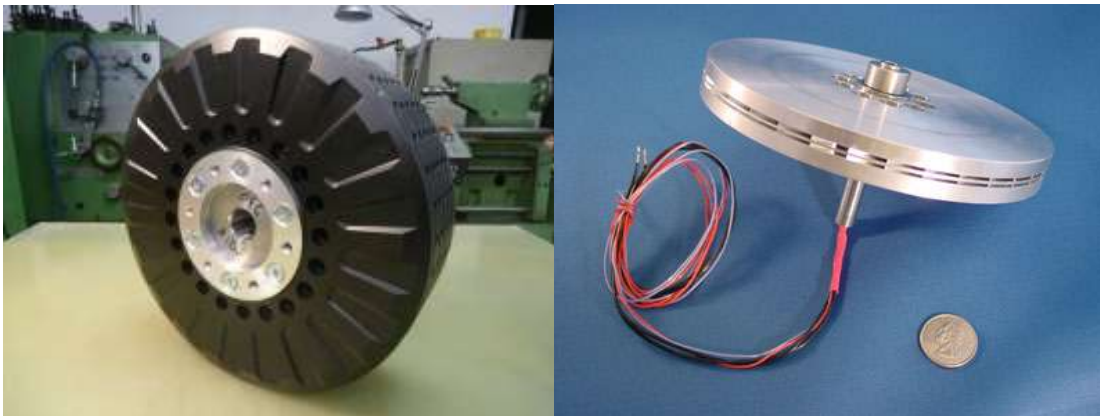
Ez az irigylésre méltó könnyedség, amit a pilótás repülésben is el akarunk érni – és amint a kezdeti sikerek mutatják nem reménytelenül.

Az axiális motorok még nem annyira elterjedtek – ennek ellent mond, hogy éppen ilyen az a 12kg-os EMRAX, amit Roman Sušnik cége az Enstroj [10] kínál. Hasonlóan különleges a

¹⁰ <http://blog.cafefoundation.org/?p=3303>

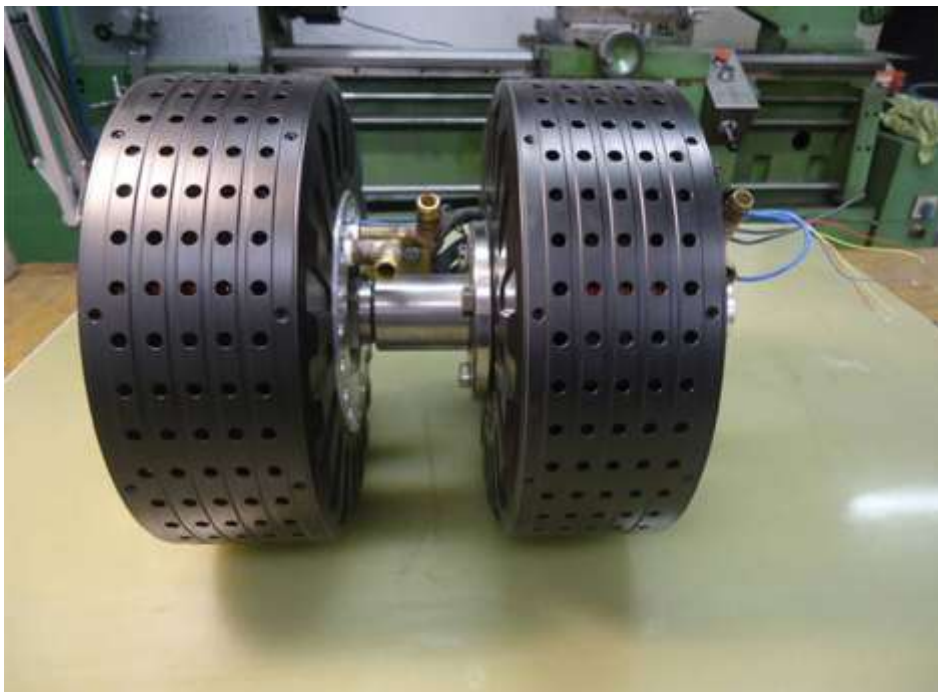
¹¹ <http://www.forschungsbuero.de/html/elektromotoren.htm>

Launch Point technologies Halbach Array motorja, amelyik 0,7 kg tömeggel 7 LE-t tud termelni 8700 percenkénti fordulatszám mellett. (Emlékeztetőül a jó boxer repülőmotorok alig tudják az 1 kg/LE tömeg/teljesítmény arányt tartani.)



8. kép A 30/60kW-os EMRAX motor és a LaunchPoint 7 LE-s prototípusa ^{12 13}

Az előbbi a közvetlen légcsvarhajtást áttétel nélkül tudja biztosítani, míg a DARPA¹⁴ megrendelésre készült utóbbi inkább csak a nagy teljesítménysűrűség bizonyítására szolgál. Az axiális motorok egy, vagy két légréssel készülnek, de ha nagyobb teljesítmény szükséges, akkor többet egy tengelyre lehet „fűzni”. Ezt a lehetőséget használja ki az EMRAX TWIN is.



9. kép Az EMRAX TWIN – két vízhűtéses motor párhuzamosan kötve ¹⁵

A párhuzamos üzem természetesen kiforrott vezérlést igényel, amire az egyenletes terhelés elosztás érdekében itt nagy szükség van.

¹²http://img.mfrbee.com/photo/v2/108766837/EMRAX_up_to_60kW_electric_motor_%28weight%3A_11kg%29.jpg

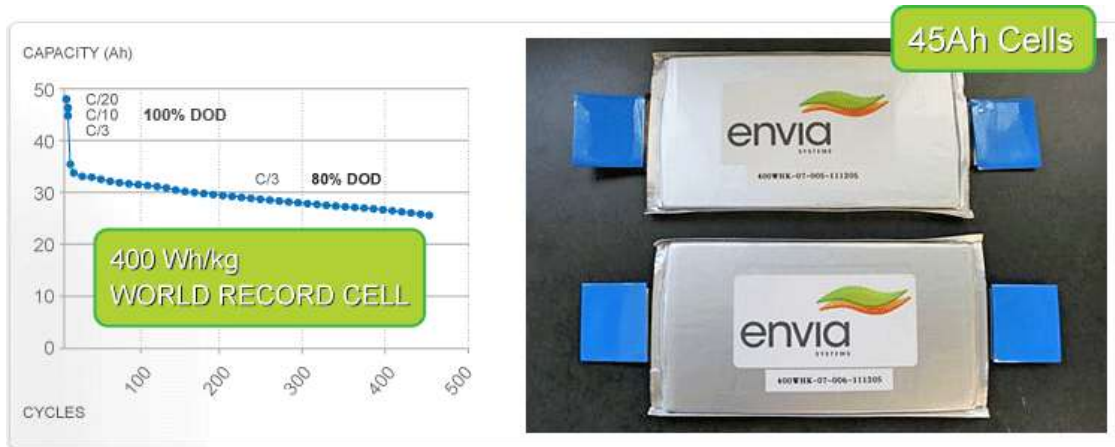
¹³ <http://ww1.prweb.com/prfiles/2009/09/17/1925464/DARPAmotorprototype.jpg>

¹⁴ DARPA - Defense Advanced Research Projects Agency, azaz *Fejlett Védelmi Kutatási Projektek Ügynöksége*

¹⁵ http://www.enstroj.si/images/stories/emrax_motors_twin.jpg

Akkumulátorok

Ha a motorok már (szinte) elérték a kívánt tömeg/teljesítmény viszonyt, az energiatárolókra még sok „javulnivaló” vár. Bár az igazi pioneer-ok még NiCd akkumulátorokkal kezdtek repülni és azokhoz képest a mai 40-65 C-s LiPo-k csodának számítanak – mégis, az élen járó Envia is „csak” 400 Wh/kg-ot tud produkálni.



10. kép Az Envia 45 Ah-s LiIon akkumulátora

A Pipistrel Taurus G2 – a G4 ikerpáros egyik tagja – a mintaszerű gyár szelleméhez híven az akkumulátorokat is rendkívüli felügyelettel kezeli. A Luka Žnidaršič -al közösen fejlesztett ESYS-MAN folyamatosan indikálja a motor és a telepek hőmérsékletét, a töltöttségi állapotot, a fordulatszámot és az elektromos rendszer leadott teljesítményét, állapotát. Egy szabványos műszerházban helyezkedik el és mindössze két kapcsolót (Be/Ki és motor fel/le) és egy forgatógombot (motor fordulatszám beállítás) tartalmaz. A műszer nem csak indikál, ha szükséges be is avatkozik – pl. ha a motor, vagy valamelyik akkumulátor túlmelegszik - csökkenti a motor fordulatszámát.



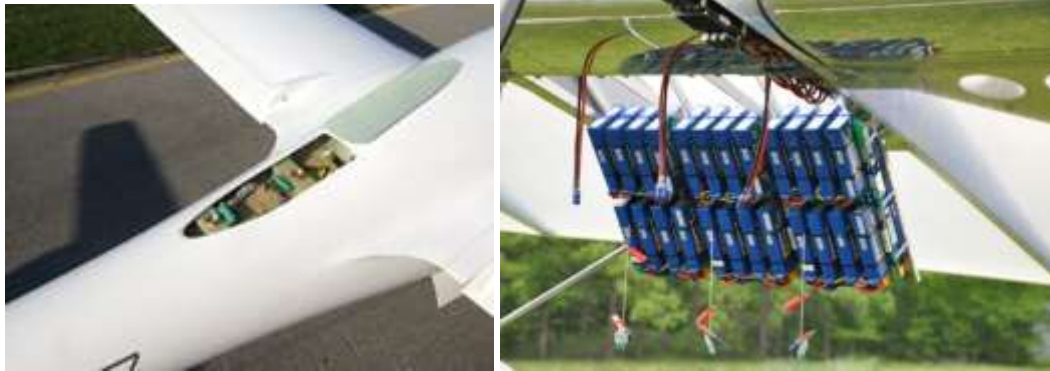
11. kép. A Pipistrel Taurus Electro G2 egyik akkumulátora és az ESYS-MAN^{16 17}

A gyártók a számítógép ipar és a modellezők nagy tábora számára kedveznek – viszonylag kis, néhány Ah kapacitású akkumulátorokkal tömegével árasztva el a piacot, ahol aztán kü-

¹⁶ <http://www.pipistrel.si/photo/6659>

¹⁷ <http://www.pipistrel.si/photo/6574>

lőnböző néven kapható szinte ugyanaz. Az autóipar a LiFePo –t a számítógépek a LiIon –t , a modellezők a LiPo -típust kedvelik. Az E-repülőkben a 40 Ah-s Kokam-tól egészen a 5-6 Ah-s Zippy nevű nagyon kedvező árú celláig szinte minden megtalálható. A különbség talán a kisebbek javára mutat kedvező tendenciát – azok jobban „kapaszkodnak”, javul a terhelhetőségük, csökken az áruk, míg a „nagyok” alig változnak.



12. kép A 28 db 40Ah-s Kokam a Lak-17 FES fedélzetén és 96 db 5 Ah-s Zippy a Lazair szárnyai alatt ^{18 19}

Az elmúlt évben az Oshkosh-i repülő show-n két új elektromos konverzió is megjelent, az egyik volt Dale Kramer 30 éves kétmotoros Lazair-je, amit a szárnyakba (nagyon szépen) összedrótózott modellező akkumulátorokkal és két villanymotorral frissített fel. A repülőgép ráadásul úszó talppal is fel volt szerelve – a délelőtti száraz bemutatót követően délután a tóról is felszállt. [11][12]

Hasonló nagy visszatérő Mark Beierle, aki az egyébként is sikeres Gull 2000 gépét „díszítette fel” egy E- jelzővel – és naponta bemutatót repült, tüntetően mindig a füves pályáról. [13][14] A további érdekesség, hogy az E-Gull 2000 motorját az a Thomas Senkel építette [15] aki 2011 októberben elsőként repült modellmotorokkal megépített multicopterrel. [16] Amint látható, az akkumulátorokat Ő is a modellezőktől „kölcönözte”.



13. kép Thomas Senkel első repülése a modell-motorokkal²⁰

¹⁸ <http://www.front-electric-sustainer.com/technology.php>

¹⁹ <http://static.rcgroups.net/forums/attachments/3/6/4/8/9/a4053202-116-Open%20Batts%20-%20CLOSE.jpg>

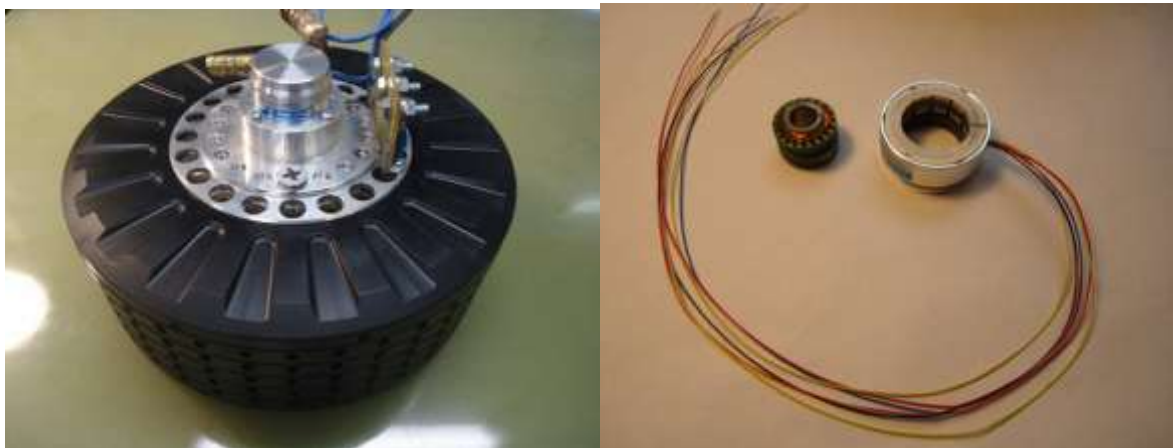
²⁰ <http://e-volo.com/Prototype.html>

Szabályzók

A motoroknak szánt villamos energiát át kell alakítani, mégpedig egyenáramból háromfázisú váltakozó árammá – ami nem óriási feladat, de vannak ennek is „titkai”. A legszembetűnőbb az, hogy egyes (általában nagyobb) motorokon vannak külön szenzorok, amelyek jelzik a forgórész helyzetét, míg a többség e-nélkül is (látszatra) jól működik.

A modellezőknek szánt nagyáramú szabályzókat már többen használják az elektromossá konvertál repülőgépekben, aminek az anyagiak mellett még az is lehet oka, hogy tényleg egyre jobbak – különben a nagy túlkínálatban nem veszik meg.

A profi hajtások – ahol minden másodperc számít, minden információ fontos – a szabályzást is a motor szenzorok alapján végzik. Ilyen az új EMRAX, amelyik a kihajtással szemben egy Resolvert visel, ami a pólusai számával megegyező „kicsinyített” mása – de generátor – és így a forgórész helyzete nagyon pontosan ismert lesz. A terhelésfüggő szabályzásnak éppen ez a módja, hogyha a forgórész még fázisban van, de a terhelés hatására kezd lemaradni, akkor a szabályzó jel elkezd siettetni. Ezzel megakadályozható, hogy a leterhelt forgórész csússzon a tápláló jel frekvenciájához képest.



14. kép Az EMRAX motorok 2011. szeptembertől már Resolverrel szerelve jönnek ki ^{21 22}

A szabályzók illesztése az adott motorhoz, akkumulátorhoz sok tudást és tapasztalatot igényel. A repülőmotorok terhelési mutatói elég jól ismertek – fékpadokon jól rekonstruálhatók és a szabályzók felépítése és működése is ezekhez igazítható.

ZÁRÓ GONDOLATOK

Az elektromos hajtás most kezdi felfelé ívelő pályáját, aminek a kutatók, fejlesztők adják az ívét és természetesen a gyártók, kereskedők, sőt a vásárlók is érdekeltek a sikerben. A technológia szűk keresztmetszeteiből megemlítve párat úgy gondoljuk érezhető, mennyi feladat vár még ránk és az is, hogy megoldásuk nem lehetetlen. A „global village” közelebb hozza az embereket, már „átlátunk” a tengereken, értesülünk mások eredményeiről – feltehetően Ők is

²¹ <http://www.enstroj.si/News/emrax-motor-with-resolver-application.html>

²² <http://www.enstroj.si/News/emrax-motor-with-resolver-application.html>

a mieinkről. A „Green Flight Challenge” és a hasonló megmérettetések naponta tárnak fel új utakat és megoldásokat. A legnagyobb feladat most a villamos energia megfelelő hatásfokú előállítás – a fedélzeten. A jelenlegi energiátárolók korlátai lassan, de szélesednek, minde mellett forradalmi javulás szükséges a fotoelektromos átalakítók terén is.

A nagy távolságok tiszta, csendes átrepülése a közeljövőben már elérhetővé válhat – a repüléstechnika fejlődése ebbe az irányba mutat – a hogyan, miként kérdésekre nekünk is kell keresni a választ. Az elektromos hajtású repülőgépek lehetőségeit, egyes megoldásait az egyetemi kutatásban, oktatásban is hasznosítva próbáljuk közkinccsé tenni. Ennek eredményeiről a tudományos fórumokon adunk számot – a munka ütemének megfelelően.

Bátoríthat bennünket az a tény, hogy a nagy eredmények nem feltétlenül csak nagy és tehetős országokban születnek – mint azt szlovéniai példákából is láthattuk. A mi országunk, egyetemünk sem szűkölködik tehetségekben, a kihívás, pedig itt van előttünk, tehát ahogy Eric Raymond is mindig mondja –

„REPÜLJÜNK NAPPAL”!

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] http://cafefoundation.org/v2/gfc_main.php
- [2] <http://solar-flight.com/>
- [3] <http://www.solar-flight.com/news.html>
- [4] http://www.youtube.com/watch?v=zRQvwst-hTE&feature=mfu_in_order&list=UL
- [5] <http://www.eumozaik.hu/trendi/technika/solar-impulse-napelemekkel-foeld-koeruel>
- [6] <http://blog.cafefoundation.org/?p=4522>
- [7] http://cafefoundation.org/v2/gfc_2011_results.html
- [8] Makkay Imre, „Green Flight Challenge” – egy igazi kihívás a repülésben, Repüléstudományi Közlemények 2012. április. 12. Különszám Paper online. p.9 (2012) – kézirat
- [9] http://wiki.xtronics.com/index.php/Energy_density
- [10] <http://www.enstroj.si/>
- [11] <http://www.youtube.com/watch?v=bBeJAx7eCo&noredirect=1>
- [12] <http://www.youtube.com/watch?v=YINO0aoSAGg>
- [13] <http://www.youtube.com/watch?v=lEqz0rSZ0v8>
- [14] <http://www.youtube.com/watch?v=JPEgxxNi6lo>
- [15] <http://www.youtube.com/watch?v=PXI5d0Aws0Y>
- [16] <http://www.youtube.com/watch?v=L75ESD9PB0w>