

Dr. Békési Bertold¹

REPÜLŐGÉPEKEN ALKALMAZOTT DIGITÁLIS ADATBUSZOK²

A repülőgépeken az avionika szolgálja ki a villamosenergia-ellátás, a világítás, a hírközlés, a navigáció eszközeit, de ugyanígy felel a hajtóművek, repülésvezérlés, vagy a futómű villamos vezérlő és jelzőrendszeréért. A korszerű fedélzeti berendezések között a rendkívül összetett és nagysebességű információáramlást digitális adatbusz rendszerekkel valósítják meg. Az írásmű célja ennek az új eszköznek és eljárásnak a bemutatása – a széleskörű szakmai érdeklődők számára.

DIGITAL DATABUS ON BOARD OF AIRPLANE

The avionics serves on board of airplanes electric supply, lighting, communications, navigations tools, but also responsible for engines, flight controls, landing gears, and diagnostic systems. The advanced on-board equipment of the very complex and high-speed digital data bus flow of information systems implemented. The writing of this work is the presentation of the new tools and procedures – a wide range of professional interested.

BEVEZETÉS

A Második Világháborúban az elektronika megjelent a repülőtechnikában is. A repülőgépek közötti és a földi irányítással kapcsolatot teremtő rádióhíradás rendkívül intenzíven fejlődött. A magnetron új lehetőségeket teremtett a földi és fedélzeti felderítő rádiólokátorok számára.

A digitális technika alapelvei már ismertek voltak azelőtt, hogy a repüléstechnikában alkalmazni kezdték volna. A Második Világháborúban a Colossus nevezetű kód-feltörő gép rengeteg elektroncsövet használt, a hatalmas mérete miatt természetesen nem lehetett a fedélzetre vinni.

A számítástechnika történetének nagyjai között Neumann, Mauchly, Eckert, Atanasoff, Berry és Goldstine neve mellett meg kell említenünk Alan Turingot is, aki részt vett az első elektronikus, digitális számítógép tervezésében a II. világháborúban, de erről a világ mit sem tudott az 1970-es évekig.

Az ő elmélete és Max Newman tervei alapján 1943-ban megépítették a Colossus nevű elektronikus számítógépet a náci vezérkar által használt Lorenz titkosítás feltörésére. A Colossus elektronikus elven működő, programozható, digitális számítógép volt, Turing algoritmusát felhasználva, és továbbfejlesztve építették meg.

(Sok helyen lehet olvasni, hogy ő tervezte vagy építette a Colossust – ez nem igaz. Az ő elméletét használták a kódfeltörő algoritmushoz.) A háború végén már tíz, továbbfejlesztett Colossus II. dolgozott az üzenetek dekódolásán. A háború után azonban ezeket a gépeket

¹ okleveles mérnök alezredes, egyetemi docens, Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem Katonai Repülő és Légvédelmi Tanszék, e-mail: bekesi.bertold@zmne.hu

² Lektorálta: Prof. Dr. Makkay Imre, egyetemi tanár, CSc, Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem Katonai Repülő és Légvédelmi Tanszék, makkay.imre@zmne.hu

megsemmisítették, a tervrajzokat is titkosították [1].

A Második Világháborúban az elektronika megjelent a repülőtechnikában is. Az 1960-as évektől az elektroncsöveket kezdte felváltani a tranzisztor - bizonyos alkalmazásokban. A 1970-es években a tranzisztorokkal már digitális áramköröket fejlesztettek a repülő rendszerek számára. Kezdetben ezek kizárólag a katonai repüléstechnikában kerültek felhasználásra, mint navigációs és harci berendezések.

A fedélzeti elektronika alkalmazása sok éven keresztül korlátozott volt – az analóg rendszerek jelszint- és feszültség ingadozásai és egyéb lineáris és nemlineáris problémáik miatt, melyek a rendszert megbízhatatlanná tették.

Az első digitális rendszereket is használó repülőgépet, a North-American A-5 Vigilante-ot az Amerikai Egyesült Államok fejlesztett ki a 1960-as években, és üzemeltette az US Navy anyahajóján.

Az 1960-as években ez a technika még nem létezett az Egyesült Királyságban egészen addig, amíg az Anglo-French Jaguar és a Hawker Siddeley Nimrod fejlesztésbe nem kezdtek. A céljuk az volt, hogy a digitális technikát az egész repülőgépen alkalmazzák, így alkották meg a TSR 2-öt, mely fejlesztését később a Brit kormány 1965-ben leállította. A TSR 2-ön alkalmazott technika alapját a félvezető tranzisztorok alkották, bár ez a technika ekkor még gyerekcipőben járt.

Az 1970-es évek második fele és az 1980-as évek eleje óta elképesztő mértékben kezdték alkalmazni a digitális technikát, ennek a kulcsfontosságú elemei a már rendelkezésre álló, és nem drága digitális adatbuszok voltak, úgy, mint az ARINC 429, MIL-STD-1553B illetve az ARINC 629. Az olcsó mikroprocesszorok, valamint a szoftveres fejlesztések tették lehetővé ezek széleskörű elterjedését és ma már gyakorlatilag egyetlen repülőrendszer sem képes nélkülözni ezt a technikát. Az 1. ábrán az intenzív fejlesztés jelentősebb állomásai láthatók.

Hajtómű vezérlés	1950	1960	1970	1980	1990	2000
Repülés vezérlés		Analóg elektronikus hajtóművez.	Részleges digitális hajtóművez.	Teljes digitális hajtóművez.	Digitális elsődleges/mechanikus tartalék	Digitális elsődleges/nincs mechanikus tartalék

1. ábra Főbb elektronikai fejlesztések 1950-es évektől

Az analóg hajtóművezérlő rendszereket első körben az Ultra vezette be még az '50- es években, amely elektronikus jelzésű gázkarral volt ellátva, úgy, mint a Bristol Britannia. Teljesen digitális hajtóművezérlő rendszereket csak az 1980-as évek óta készítenek.

Az Airbus A320-as családra jellemző az elsődleges digitális vezérlés – mechanikus biztonsági rendszerrel. Az A330\A340-es típusoknál oldalsó vezérlő kart, a B777 típusnál, pedig hagyó-

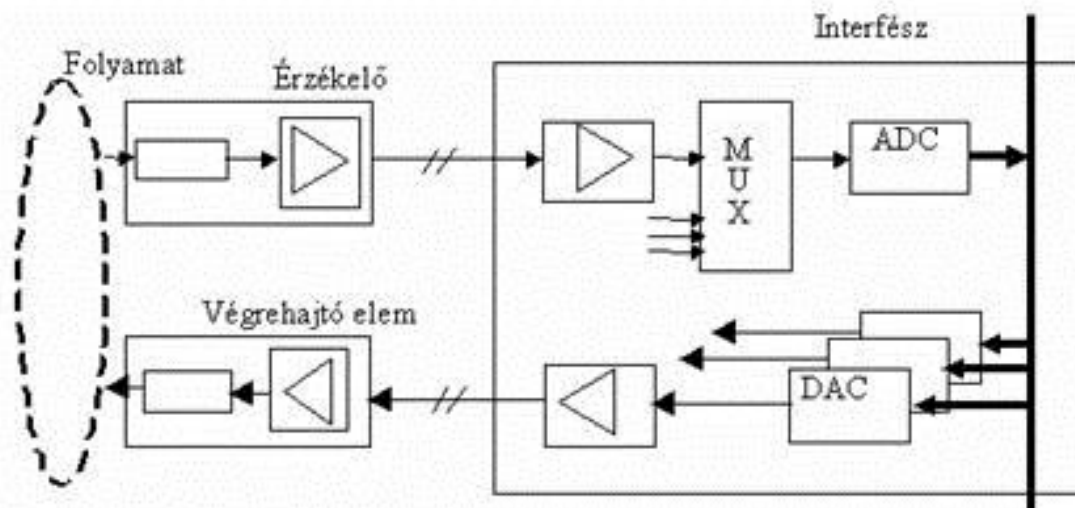
mányos szarv-kormányt használnak. Az Airbus A380-as és a Boeing 787-es típusoknál már csak digitális szabályozó berendezések működnek – mechanikus biztonsági rendszer nélkül.

Annak ellenére, hogy a repülőgép segédberendezéseiben a digitális technikát csak később vezették be – erről egy későbbi cikkben esik majd szó – a mai fedélzeti rendszerekben gyakorlatilag már minden digitális. Azért, hogy megértsük ennek jelentőségét, nézzük meg a korszerű avionika egy szegmensét, az adatbuszokat – kicsit részletesebben.

A MIKROELEKTRONIKAI ESZKÖZÖK FAJTÁI

A teljesen digitális rendszereknek tartalmazniuk kell olyan interfészeket, amely az analóg „valós világgal” lépnek kapcsolatba. A mikrovezérlők és a Bemenet\Kimenet (I/O) alkalmazás specifikus integrált áramkörök (ASICS - Application Specific Integrated Circuits) a kapuk a digitális és az analóg világ között. Az A\D és D\A konverterek feladata az analóg jelek átalakítása digitális jellé, és fordítva. A CPU-k és memóriák együtt az ASICS-kel hajtják végre a digitális jelfeldolgozással kapcsolatos feladatokat. (lásd 2. ábra)

A félvezetőket a gyártás különböző szakaszaiban, különböző részeinél szigeteléssel vonják be, hogy az árnyékolás megfelelő legyen. A legtöbb technológia az 1-3 mikron hosszúságú mikrovezérlőket alkalmazza. (1 mikron, az 1 méter egymilliomod része) tehát nagyon apró dologról van szó. A készülék 0,4 hüvelyk nagyságú és akár százezer tranzisztort\kaput is tartalmaznia kell, hogy a kívánt feladatot megfelelően el tudja látni. A gyártás alatt néha hibás méretűek is keletkezhetnek, melyeket később, már méretre vágva lehet értékesíteni.



2. ábra. Az analóg folyamatok vezérlése digitális áramkörökkel [2]

A félvezetők mérete, összetettsége, a technológia kiforrottsága, valamint az anyag minősége fogja meghatározni, hogy abból a félvezető körből hány darab hibás és hány darab hibátlan fog készülni a gyártás alatt és ez meg fog érződni az árban, illetve a termelékenységben. A szabványosított eszközök, mint az ARINC 429 és a MIL-STD-1553B széleskörű ipari felhasználásra alkalmasak, míg mások nem érik el ezt a szintet. (lásd 3. ábra)

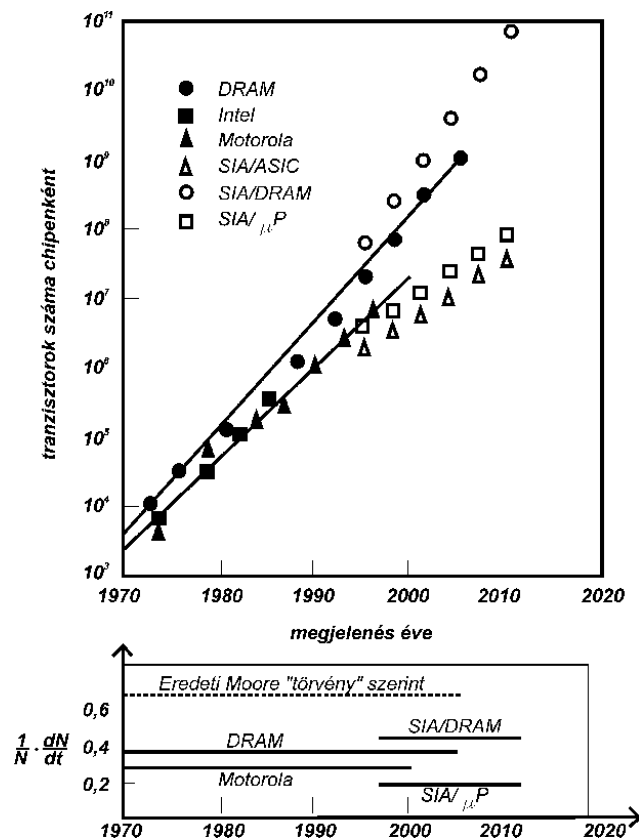
A mikroelektronikai készülékeket az alkalmazási környezet szempontjából is megvizsgálják, és három kategória valamelyikébe sorolják:

- kereskedelmi,
- ipari,
- repülő katonai – a polgári repülés is ebbe a kategóriába esik.

A tapasztalatok azt mutatják, hogy a szűrési technika segített fejleszteni a minőséget, futamidőt és a gyártási eljárást.



3. ábra Egy félvezető szelet [3]



4. ábra Az integrált áramkör fejlesztés tendenciái [4]

Habár növekvő, de az összes felhasználóhoz képest kis hányadát használja a repülő technika az elkészült mikroelektronikai áramköröknek. Van olyan vélemény, hogy a besorolás csak az áramkörök árát növeli – a magasabb kategóriákban. Azt remélik, hogy a repüléstechnikai beszállítók a jövőben nagyobb felelősséggel fognak ügyelni a minőségre. Van egy növekvő és



gyorsuló trend a repülőgép fedélzeti mikroelektronikában, amit a számítógépes és híradástechnikai ipar is gerjeszt.

Egy évtized alatt a tranzisztorok száma tízszeresére emelkedett a mikrovezérlőkben (lásd 4. ábra). A gyorsaságuk is megnőtt. Míg az elektroncsövek kapcsolási ideje $1\mu\text{S}$, 10-szer gyorsabbak tranzisztoroké 100 nS , a szilícium mikrovezérlőké pedig 1 nS – és ez már a mindennapok technikája.

A gyorsaságon kívül a fejlesztések másik fontos iránya az áramfogyasztás csökkentése. Ez függhet a technológia típusától, illetve a számítási műveletek gyorsaságától. A gyorsabb számítás nagyobb energiaigénnyel jár, és fordítva.

A fejlesztés legfontosabb területei:

Processzorok

Az első mikroprocesszor az 1971-ben megjelent 4 bites szóhosszúságú volt. Később több sikeres 8 bites sorozat jelent meg több gyártó részéről (Intel 8008, 8080, 8085, Zilog Z80, Motorola 6800, MOS Technology 6502).

A 80-as évektől kezdve megnőtt a processzorok szóhossza (Intel 8086 (az IBM PC és PC/XT processzora): 16 bit (20-bites címtartomány), Intel 80286 (a PC/AT processzora): 16 bit (24 bites címtartomány) – 1982, Intel 80386: 32 bit – 1985) az órajel folyamatos növekedése mellett [5].

A család első tagja, 1979-ben jelent meg. 32 bites belső felépítéssel, de 16 bites külső adat és 24 bites külső címbusszal rendelkezett. Rengeteg variációban és tokozásban készült az évek során, fontosabb variációi a 68008, amely 8 bites külső adatbusszal rendelkezett (például a 8 bites Sinclair QL-ben használták), valamint a 68010, amelyet – bár külső MMU segítségével – de felkészítettek a virtuális memória kezelésére is. Ezt a processzort használta a European Fighter Aircraft és a Boeing 777 is [6].

A kezdeti kedvezőtlen próbálkozások után az USA Légierője bevezette a MIL-STD 1750A szabványt, amely meghatározza az utasításkészletet (Instruction Set Architecture-ISA), amelyekkel a repülőgépeket programozni lehet [7].

Memóriák

A számítógép memóriája a processzor mellett alapvető fontosságú alkatrész [8].

A memória elektronikus adattárolást valósít meg. A számítógép csak olyan műveletek elvégzésére és csak olyan adatok feldolgozására képes, melyek a memóriájában vannak. Az információ tárolása kettes számrendszerben történik [9].

A memóriák csoportosítása:

A memóriákat fizikai szempontból két csoportra osztjuk:

- **ROM (csak olvasható) típusú memóriák:** Tartalmuk kiolvasható, de nem változtatható meg. Programozásuk a gyártáskor történik. A számítógép vezérléséhez szükséges alapvető parancsokat tartalmazza. Információtartalmukat a gép kikapcsolása után is megőrzik.

Speciális fajtájuk:



- PROM, melyet a felhasználó egy speciális készülékkel programozhat, utána azonban tartalma csak olvasható.
- EPROM, mely ultraibolya (UV) fényvel törölhető, majd újraírható;
- EEPROM (elektronikusan törölhető PROM): Elektromos feszültséggel törölhető és újraírható. Ilyenek például a Flash memóriák³ is).
- **RAM (írható és olvasható) típusú memóriák:** Olvashatók, törölhetőek és újra írhatók. Külső tápfeszültségre van szükségük az adatok tárolásához, vagyis a gép kikapcsolásakor az adatok elvesznek. Operatív tár céljára használják. Egy program futtatását a számítógép úgy végzi el, hogy először beolvassa a programot a RAM-ba, majd egymás után végrehajtja a parancsokat [10].

Adatbuszok

A busz vagy sín a számítógép-architektúrákban a számítógép olyan, jól definiált része, alrendszere, amely lehetővé teszi adatok vagy tápfeszültségek továbbítását a számítógépen belül vagy számítógépek, illetve a számítógép és a perifériák között. Eltérően a pont-pont kapcsolattól, a busz logikailag összekapcsol több perifériát ugyanazt a vezetékrendszert használva. Minden buszhoz számos csatlakozó tartozik, amelyek lehetővé teszik a kártyák, egységek vagy kábelek elektromos csatlakoztatását.

A korai számítógépek buszrendszerei betű szerinti értelemben párhuzamos elektromos buszok voltak, több csatlakozóval, de fizikai kiépítésükben eltértek attól, funkcionálisan viszont azonosak voltak. A mai modern számítógépek buszai már párhuzamos és bit-soros kapcsolatokat is meg tudnak valósítani, vagy (elektromosan) párhuzamos huzalozásúak sokcsatlakozósak (multidrop), vagy pedig lánc topológiával rendelkezők, illetve egy kapcsoló hub-hoz csatlakozók, mint például az USB (univerzális soros busz).

A MIL-STD-1553 volt az első szabványosított adatbusz, amit az Amerikai Egyesült Államok Légierője rendszeresített 1974-ben. A civil repülésben az ARINC 429-es adatbusz volt az elfogadott. Ezt használta a Boeing 757 és 767 típusok, valamint az Airbus A300/A310 is az 1970-es évek vége és az 1980-as évek elején. A korai '80-as években a Boeing fejlesztésekbe kezdett, hogy egy erősebb, gyorsabb adatbuszt hozzon létre. Ez lett később az ARINC 629-es szabvány, melyet kizárólagosan a Boeing 777 használ. Jellemzője a Digitális Autonóm Terminál Összeköttetés (Digital Autonomous Terminal Access Communication - DATAC).

Ebben az időben nagy erejű fejlesztések folytak a processzorok, memóriák, adatbuszok és egyéb mikroelektronikai készülékek terén, mely megkönnyítette a repülőtechnikai alkalmazásokat. Korábban nagy mennyiségű kábelköteget használtak a rendszerek közötti kommunikáció biztosítására, melyek bonyolultak és lassúak voltak. Az adatbuszok nem tapasztalt ütemben gyorsították és tették biztosabbá az adattovábbítást.

A mikroelektronika legnagyobb hatása az elektronikai rendszereken került bevezetésre szabványosított digitális adatbuszok nagymértékű javításával, melyek biztosították az összekötte-

³ A **flashmemória** egy nem-felejtő, megmaradó („non-volatile”) típusú számítógépes adattároló technológia, mely elektronikusan törölhető és újraprogramozható. (http://hu.wikipedia.org/wiki/Flash_mem%C3%B3ria)



tést a légijármű-rendszerekben. Korábban a repülőgépeken nagy mennyiségű kábelezésre volt szükség a csatlakozáshoz és egyéb berendezések számára.

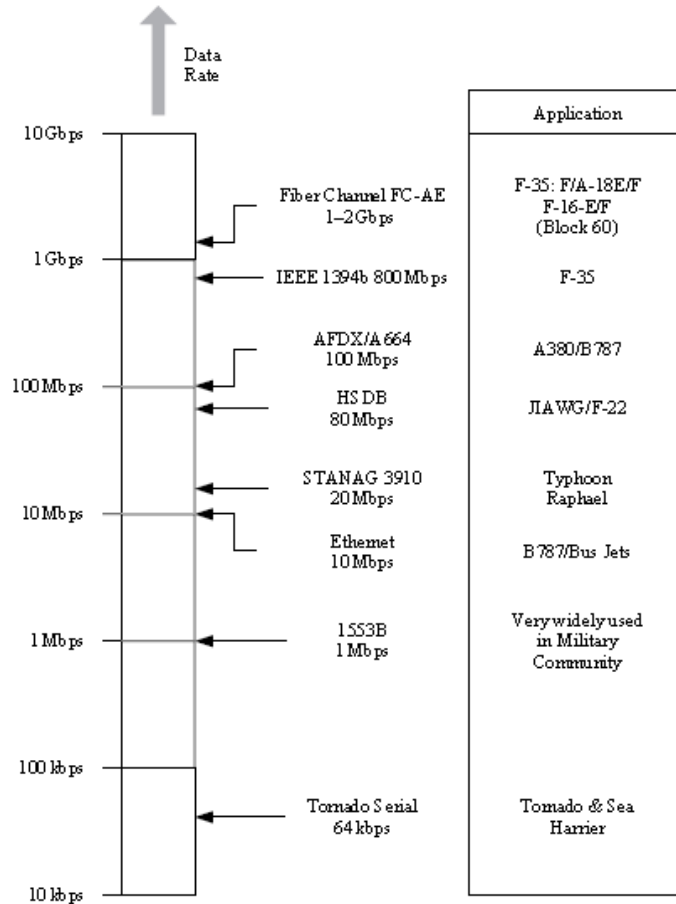
Ahogy a rendszerek összetettebbé és integráltabbá váltak, ezt a problémát súlyosbították. A digitális adatátvitel-technikák olyan kapcsolatokat használnak, amik berendezés között küldik el a digitális adat áramlásait. Ezek az adatkapcsolatok felölelnek csak két vagy négy csavart vezeték, és ezért az összekötő vezetékek száma jelentősen csökken.

Közös típusú digitális adatátvitel a következők:

- Egy forrás - egyirányú összeköttetés (szimplex kapcsolat). Két fizikai vagy logikai végpont közötti összeköttetést, adatátviteli utat jelöl vagy foglal magában. Az adatok csak egy irányban áramolhatnak, az ellentétes irányban nem lehetséges adatáramlás. Ez a legkorábbi alkalmazás, ami egy dedikált kapcsolatot az egyik berendezés a másikkra. Ezt fejlesztették ki az 1970-es években használható Tornado és Sea Harrier repülő elektronikai rendszereken. Ezt a technikát nem használják a repülőgéprendszerek integrációjára (Ez a '70-es évek fejlesztése volt, a repülőelektronikában nem került felhasználásra. A Tornado és a Sea Harrier rendszerekre tervezték őket.)
- Egy forrás – váltakozó irányú összeköttetés (Félduplex kapcsolat). Fizikai vagy logikai összeköttetés, adatátviteli út két végpont között, amelyen keresztül mindkét irányba továbbíthatnak adatokat, de egyszerre csak az egyik irányba. A félduplex összeköttetés fontos paramétere az irányváltási idő, vagyis a küldő és fogadó szerepcseréjéhez szükséges idő. Az adatátvitelhez egy vagy több vivőfrekvenciát is használhatnak az állomások, a kapcsolatban ez lényegtelen. Az ARINC 429-es is félduplex kapcsolatot biztosít. Ilyet használnak többek között a polgári utasszállító és az üzleti repülőgépek.
- Több forrás - kétirányú összeköttetés (Duplex kapcsolat). Két végpontot összekötő, fizikai vagy logikai kapcsolat, adatátviteli út jelzője. A kapcsolaton keresztül egyidejűleg mindkét irányban küldhetők adatok. Ez az úgynevezett teljes-duplex rendszer, és széles körben alkalmazott katonai felhasználók (MIL-STD-1553B), valamint a B777 (ARINC 629).

Az adatbuszok használata rendkívüli módon megnövekedett az elmúlt pár évben. Ez a hatalmas kereslet eredményezte azt, hogy mára kereskedelmi úton forgalmazzák ezeket az adatbuszokat (Commercial-off-the-Shelf) direkt az informatika és a távközlési ipar számára.

Mindezt a jó tulajdonságainak köszönheti: gyorsaság, előállítási költségek, rendelkezésre állás és futamidő. Azonban e tulajdonságai mellett is nagy hangsúlyt kell fektetni arra, hogy csak az igazán kiválóak kapjanak szerepet a repülőtechnikában. Az 5. ábra. bemutatja a legtöbb, ha nem is az összes adatbuszt, amelyeket a repülőgépeken alkalmaznak az adatátvitel sebességének megfelelően.



5. ábra Adatbusz fejlődése [11]

A legújabb adatbuszok, amik felhasználásra kerültek a repülőtechnikában az IEEE 1394b, amit a Joint Strike Fighter (JSF)/F-35-ön alkalmaznak, valamint az AFDX/ARINC 664, amit az Airbus A380 és a Boeing 787 típus használ.

ZÁRÓ GONDOLATOK

Az AVIONIKA a korszerű repülőgépek „szíve” és „esze” amely nélkül elképzelhetetlen a fedélzeten működő ezernyi egység, részegység összehangolt működése. Az elektronikai ipar legújabb és – a tervezők, kivitelezők szándékai szerint – csak a legmegbízhatóbb termékei kerülhetnek alkalmazásra a repülésben. A repülés – ellentétben a szárazföldi, vagy vízi közlekedési eszközökkel –,türelmetlen” az AVIONIKA esetleges bizonytalansága miatt (a „francia autó” típusú szoftverhibák a levegőben nagyon kellemetlenek.)

A digitális adatbuszokat – először a hadi-, később a polgári repülésben szerzett tapasztalatok alapján – ma már a járműipar minden területén alkalmazzák. Az „úttörők” az első alkalmazói voltak a digitális áramköröknek és ma is élenjárói a legújabb fejlesztéseknek, a „szoftver-repülőknék”.

A harci és polgári repülőgépek AVIONIKA rendszerének e nélkülözhetetlen elemét természetesen sokkal részletesebben és mélyrehatóbban lehet tanulmányozni – amelyhez a cikk megírásakor áttekintett irodalmat is az olvasók szíves figyelmébe ajánljuk.



A CIKKHEZ KAPCSOLÓDÓ – JAVASOLT - IRODALOM

- [1] B. Middleton *et al.* (1989) *Avionics Systems*. Harlow: Longman Scientific & Technical.
- [2] Cary R Spitzer (1993) *Digital Avionics Systems: Principles & Practice*, McGraw-Hill.
- [3] ARINC Specification 429: Mk 33 Digital Information transfer System, Aeronautical Radio, Inc., 1977.
- [4] MIL-STD-1553B Digital Time Division Command/Response Multiplex data Bus, Notice 2, 8 September 1986.
- [5] ARINC Characteristic 629, Multi-Transmitter Data Bus, Aeronautical Radio, Inc., November 1989.
- [6] Boeing 777 ARINC 629 Data Bus – Principles, Development and Application, RAeS Conference – Advanced Avionics on the Airbus A330/A340 and the Boeing 777 Aircraft, November 1993.
- [7] Aplin, Newton & Warburton (1995) ‘A Brief Overview of Databus Technology’, *RAeS Conference The Design and Maintenance of Complex Systems on Modern Aircraft*, April.
- [8] Principles of Avionics Data Buses, Avionics Communications Inc., 1995
- [9] Ian Moir and Allan Seabridge: *Aircraft Systems Mechanical, electrical, and avionics subsystems integration, Third Edition*. John Wiley & Sons, Ltd. 2008. ISBN: 978-0-470-05996- 8 [441-449]
- [10] Ian Moir and Allan G. Seabridge: *Military Avionics Systems*. Seabridge 2006 John Wiley & Sons, Ltd. ISBN: 0-470-01632-9 (47-78)
- [11] Mike Tooley *Aircraft Digital Electronic and Computer Systems: Principles, Operation and Maintenance*. Published by Elsevier 2007 (33-43)
- [12] Cary R Spitzer: *The Avionics Handbook*. Boca Raton, CRC Press LLC. 2001. [61]
- [13] Cary R Spitzer: *Avionics: elements, software, and functions*. Taylor & Francis Group, LLC, 2007.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] <http://www.rentit.hu/cikk/74/alan-turing.aspx>
- [2] <http://www.fajltube.com/biologia/szamitogepes/A-szamitastechnika-ipari-alkal65282.php>
- [3] <http://prohardver.hu/dl/cnt/2009-06/46641/28nm.jpg>
- [4] <http://www.inco.hu/inco1/innova/images/image27.gif>
- [5] <http://hu.wikipedia.org/wiki/CPU>
- [6] http://hu.wikipedia.org/wiki/Motorola_68000
- [7] <http://ru.wikipedia.org/wiki/MIL-STD-1750A>
- [8] http://hu.wikipedia.org/wiki/V%C3%A9letlen_el%C3%A9r%C3%A9s%C5%B1_mem%C3%B3ria
- [9] http://www.angela.sulinet.hu/hz/info_11/010-Alapismeretek/03-04-00-Memoria.htm
- [10] http://www.ujhelyi.sulinet.hu/x3/c3/h_2.htm
- [11] Ian MOIR and Allan SEABRIDGE: *Aircraft Systems Mechanical, electrical, and avionics subsystems integration, Third Edition*. John Wiley & Sons, Ltd. 2008. ISBN: 978-0-470-05996- 8 [441-449] Figure 12.6.

Dr. Makkay Imre¹

AZ ELEKTROMOS MEGHAJTÁS JELENE ÉS JÖVŐJE A REPÜLŐGÉPEK FEDÉLZETÉN²

A motoros repülés legfontosabb kérdése a meghajtás, melynek költsége, hatékonysága és manapság már a környezetre gyakorolt hatása is meghatározó. Az új technológiai lehetőségek a repülőgép tervezőket és építőket arra ösztönzik, hogy a folyékony és szilárd energiahordozókon alapuló meghajtások mellett az egyre elérhetőbb elektromos energiaforrásokat is alkalmazzák. A fedélzeti „fly by wire” rendszerek már eddig is a villamos áramra épülő mozgató-jelző rendszert használtak, de a hajtóművekben csak az utóbbi években jelentek meg az elektromos motorok. A dinamikusan fejlődő elektronika és a repülőipar már ma is rendelkezik néhány ígéretes kezdeménnyel, mely a közeljövőben az áttörést is meghozhatja a tisztább, energiatakarékosabb légi közlekedés felé.

ELECTRIC DRIVE TODAY AND TOMORROW ON BOARD OF AIRPLANES

At the powered airplanes the most important questions is what kind of engine what efficiency and how environmental friendly. The new possibilities of technology initiate constructors besides liquid and solid fuels using electric sources of energy becoming more and more affordable. The „Fly by Wire” used electric actuators and sensors but electric engines appeared only since last few years. Nowadays the dynamically growing electronics and air industry has a few promising initiatives what in the nearest future can give us penetrations to clean and efficient air transport.

BEVEZETÉS

A villamos áram ideális energiaforrás a helyhez kötött fogyasztók számára. A földfelszíni és földalatti elektromos kábelek, távvezetékek behálózják a világot, és kényelmes hozzáférést biztosítanak a nagy távolságról érkező energiához – mindemellett korunk egyik nagy kihívása, hogy a villamos energiát a megújuló forrásból nyerjük.

A közlekedésben a pályához kötött járművek – vasút, trolis, metró, villamos – már régóta lelkes fogyasztói a villamos áramnak. A nagyobb mozgási szabadságot az autók, hajók, repülőgépek egyelőre a rossz hatásfokú motorjaikban elégetett üzemanyaggal és annak kipöfékelt gázaival fizettetik meg. Az energiamérleg a pillanatnyi műszaki lehetőségek, és a gazdasági érdekek serpenyőiben dől el, ami néha meglepő eredményekhez is vezethet.

A légi közlekedés fokozottan „szem előtt van” – a káros anyag kibocsátás, a nagy zajterhelés a környék lakóit, de még a repülőterektől távol élőket is zavarja. A kutatók, fejlesztőknek is a leghőbb vágya a tiszta, csendes repülőgép hajtómű megalkotása – amiért a villamos áramot is megpróbálják a fedélzetre vinni és ott a hajtóműben „elégetni”.

¹ egyetemi tanár, Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem Katonai Repülő és Légvédelmi Tanszék, makkay.imre@zmne.hu

² Lektorálta: Dr. Békési Bertold okl. mk. alez, egyetemi docens, Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem Katonai Repülő és Légvédelmi Tanszék, bekesi.bertold@zmne.hu

A kísérletező kedvű amatőrök, repülő modellezők, kisebb vállalkozások – és természetesen a „fizetett” kutatók és intézeteik – naponta jelennek meg egyre jobb teljesítményű elektromos hajtásokkal, ami azt az ígéretet hordozza, hogy rövidesen megszületnek a jelenleginél kezelhetőbb, elviselhetőbb – és talán olcsóbb – elektromos repülőgép-hajtóművek.

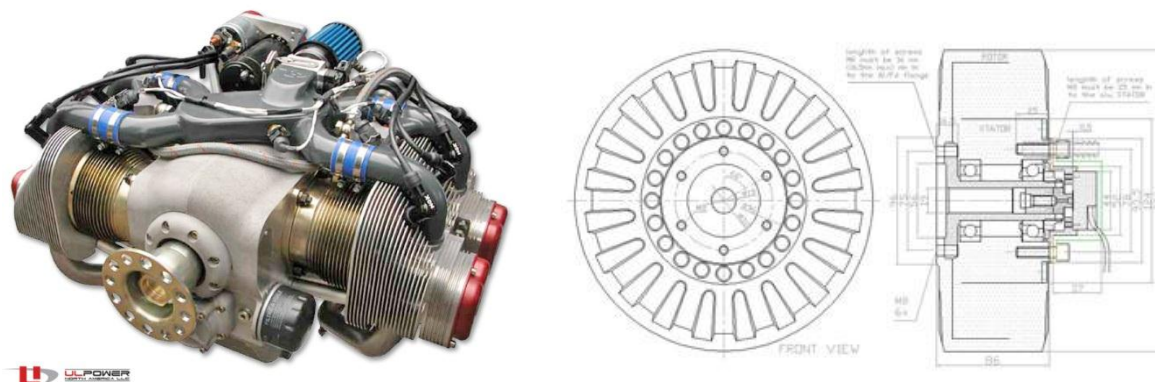
ELEKTROMOS MEGHAJTÁS A MÉRLEGEN

A motoros repülőgép – a közelmúltig – egyet jelentett a levegővel kevert éghető folyadékok, gázok belső, vagy külső térben való elégetése útján nyert mozgási energia felhasználójával. Míg a belső égésű motorok általában 25%-alatti hatásfokúak, a villanymotorokkal 90% fölött számolhatunk. Ez még akkor is jelentős különbség, ha tudjuk, hogy a folyékony üzemanyag energiatartalma 20:1 azonos tömegű tölthető akkumulátorhoz képest. Az elektromos energiátárolók fejlődése az utóbbi időben jelentősen felgyorsult, de ennek az „ára” az árában is tükröződik, ami új technológiák bevezetésekor nem meglepő. A járműipar egyre sürgetőbb igénye – ebben élen járnak az országúti alkalmazók – ösztönzi a fejlesztőket, de az igazi frappáns megoldás még várat magára. A repülőipar eközben készül az új meghajtó rendszerek fogadására, a saját kutatásaival igyekszik elébe menni a felkínált lehetőségeknek, amelyeket az elektromos hajtóművek kínálnak. Ez azt jelenti, hogy nem egyszerűen „motorcserét” hajtanak végre, hanem a teljes légi jármű újratervezésre kerül, hiszen számos új lehetőség nyílik, amelyek a fosszilis üzemanyagú repülőgépeknél eddig elképzelhetetlenek voltak.

Az elfogyasztott energián, annak árán kívül még van néhány szempont, amit meg kell vizsgálni a helyes kép kialakításához – ezek között szerepel a meghajtómotor megbízhatóság, a rendszer biztonsága, a környezeti terhelés, a működtetés és a használat komfortja valamint a beszerzés és az élettartamra vetített karbantartási költségek.

A motorok megbízhatósága

A villamos motorok – egyelőre – az általános, ezen belül is a kisgépes repülésben jöhetnek számításba, ezért a belsőégésű motorokat is ebből a kategóriából választjuk – az összehasonlításhoz.



1. kép ULPower [1] és egy EMRAX [2] motor (nem méretarányos) összehasonlítása

Egy modern négyütemű léghűtéses boxermotor, mint az ULPower közel száz elemből (különleges hő és mechanikai terhelésnek kitett, precíziósan megmunkált gépalkatrészből és számítógéppel vezérelt elektronikai áramkörből) épül. Egy hasonló teljesítményű, kefenélküli há-



romfázisú EMRAX villanymotor mindössze álló- és forgórészből, valamint 2 csapágyból áll. Az EMRAX motor konstrukcióját találmány védi, de az elkészítés körülményei és technológiája nem sokban haladják meg egy jobb háztartási mosógépmotor igényeit.

Egy autó és egy repülőgép között az egyik legszembevetőbb különbség, hogy az utóbbinál az olajnyomás, olaj-, hengerfej-, kipufogógáz hőmérsékletmérő „nem dísznek van” a műszerfalon, hanem azért, hogy a vezető egyik szemét rajtuk tartsa! Ennek az egyszerű oka, hogy ha bármelyik a szélsőértéket meghaladja, a pilótának döntenie kell a repülés folytatása, vagy megszakítása kérdésében. Mivel a levegőben megállás nem egyenlő az útpadkára lehúzódasal ezt mindenki igyekszik elkerülni, vagy legalább a lehetőségét csökkenteni.

A „minősített” repülőgépmotoroknál a gyártó általában 1200-2000 órát ad a kötelező felülvizsgálatok (Time before overhaul – TBO) között. A JET és turbólégcsavaros motoroknál ez 3000-5000 óra között jellemző. A felújítás ára nem kevés, hiszen a motort teljesen szétszedik, a kopó alkatrészeket kicserélik, majd összerakják. A repülőgép üzemben tartók – és a vásárlók – ezért nagyon érzékenyek a „ – mennyi van még a motorban?” kérdésre.

Ezzel szemben, a villamos hajtás motorja mindössze két csapágyat tartalmaz. A meghibásodásuk valószínűsége jóval csekélyebb, és ha cserére szorulnak, az is töredéke a dugattyús motor felújítási költségének.

A meghajtó rendszer biztonsága

Az üzemanyag ellátó rendszer bizonytalansága – beleértve a tankolt üzemanyag minőségének a kérdését is – érzékeny területe a motoros repülésnek. A lezuhanások jelentős számában az üzemanyag játszik szerepet – nem elég az adott feladathoz, megszakad az ellátás csőrendszerre, nem üzemszerű hőhatás éri és tüzet/robbanást okoz, rossz minőségű és csökkenő teljesítményt ad. Egy késői tartaléktankra kapcsolás is okozhat motorleállást, amikor a levegőben az újraindítás már nehézségekbe ütközhet.

A villamos hajtásláncban az energiaforrást a fogyasztóval kábel csatolja össze, miközben a fogyásról és a tartalékokról a műszerek tájékoztatnak. A fedélzeti számítógép pontos adatokkal szolgál a még megtehető távolságról és a tartalékok helyzetéről – amire az átkapcsolás nem okoz semmilyen nehézséget. A „tankolt” elektromos áram mindig ugyanolyan minőségű!

A folyékony üzemanyag fogyása a repülés során jelentősen befolyásolhatja/változtathatja a repülési tulajdonságokat. Ennek veszélye a villamos hajtásnál nem jelentkezik, hiszen a töltött/kisütött akkumulátor súlypontja nem vándorol.

Környezeti terhelés

A környezet hang és gázszennyezése a belsőégésű motoroknál igen súlyos teher, melyet mindannyian viselünk – akár repülünk, akár csak a távolról „élvezzük” a repülést. A természetvédelmi területek feletti motoros repülés korlátozása ugyan megvédi az állatokat, de jó lenne hasonló védelemben részesíteni a másutt élő védtelen embereket is.

A villamos hajtás energiacelláit a jövőben Hidrogén alapú tárolók szolgálhatják ki – amelyeknél a tárolás, előállítás hordoz bizonyos kockázatot, de melléktermék csak vízpára formájában kerül a környezetbe. A villanymotorok „zaját” már néhány méterről nehéz felfedezni. A lég-



csavar által keltette surrogást, pedig az alacsony fordulatszámmal és speciális profillal lehet csökkenteni.

Az alkalmazás kényelme

A kiszolgálás és használat egyszerűsége és komfortja mindenképpen a villamos hajtás javára billenti a mérleget. Amíg egy Rotax 912 helyes működtetése komoly felkészülést és folyamatos odafigyelést igényel, addig a villanymotor be és kikapcsolása, valamint a fordulatszám szabályozása az egyetlen elsajátítandó „tudás” amit a pilótára bízunk. Az okos elektronika egyszerűen nem engedi túlterhelni, tönkretenni a motort, vagy az akkumulátort. Nem kell foglalkozni a karburátorjegesedéssel, keverék aránnyal, olajszínttel, olajnyomással és hőmérséklettel. Az üzemi hőfok eléréséhez sem kell hosszú percekig brummogatni – a környezet nagy öröme – a motorunkat.

A villamos hajtású repülőgépen a „füles” is elhagyható – az utasok akár beszélgethetnek!

Az életciklusra vetített költség

Az ULPower beszerelési tömege 72,3 kg míg az EMRAX-é 11,8 kg. Ez utóbbi a teljes akkumulátorkészletével együtt kevesebbet nyom, mint az ULPower üzemanyag nélkül. (Az összehasonlítás persze akkor igaz, ha mindkettőt ugyanarra a célra – például motoros vitorlázó gépben – használjuk.)

A villanymotorok élettartama jelentősen hosszabb, de azt is tudomásul kell venni, hogy az akkumulátorok kapacitása 1000 kisütés után – vagy már hamarabb – csökken. A cseréjük 2000 óra használat után esedékes. A fájdalmat enyhíti, ha közben a természet ajándékaént olcsón sikerült „tankolni” és a felhasznált elektromos áram napelemből, vagy szélgenerátorból került a telepekbe.

A végső mérleg még ilyen 2000 órás csere esetén is 10-25%-al alacsonyabb üzemeltetési költséget mutat a belsőégésű motorok „újraépítésével” szemben.

Az elmúlt évtizedekben kiemelkedő eredmények születtek a motorok és energiaforrásaik új generációját ígérve. Ezekből mutatunk be néhányat – a példa és nem a teljesség igényével.

AZ ELEKTROMOS MEGHAJTÁSÚ REPÜLÉS ÚTTÖRŐI

A kísérletezések több irányban folynak – ebben jelentős részt vállalnak amatőrök, kreatív csoportok és nagy cégek is – a gazdasági erejük és érdekeltségükhöz mérten. A legkézenfekvőbb megoldásokat mindig a „szorult helyzet” szüli és ilyen, jellemzően kis költségvetésből is csodákra képes repülőmodellezők, akik elsőként alkalmazták az elektromotorokat a dugattyús hajtás kiváltására. Az akkumulátorok fejlődése néhány év alatt az elektromos meghajtások elterjedését eredményezte – kiszorítva a sokkal nehezebben kezelhető, komoly hozzáértést igénylő „nitrós” motorokat. A néhány perces repülést biztosító NiCd és a NiMH után a LiPo már több mint fél órán keresztül a levegőben tud tartani akár egy műrepülő modellt. A vitorlázó repülőmodellek ettől jóval hosszabb ideig képesek repülni, kihasználva a jó siklási tulajdonságukat és az esetleges feláramlásokat – de nézzük meg, mit tanultak az amatőröktől a „profik”.

A ma forgalmazott vitorlázó repülőgépeknél, szinte kivétel nélkül felajánlott lehetőség a hazatérő, de egyre inkább a felszállást is biztosító segédmotor. A törzsbe behajtható motor csak a szükséges ideig működik, majd elrejtve, a repülőgép siklási tulajdonságait nem rontva „lapul”, mindaddig, amíg újból ellő kell venni. Eleinte az erre a célra tervezett belsőégésű motorok szerepeltek a kínálatban, de ma már egyre több elektromos meghajtású segédmotor is fel tűnik – egyelőre borsosabb áron. A villamos hajtás kényelme, egyszerű karbantartása a gyors elterjedést sejteti, mégis van egy nagy akadály, az energia tárolása (a benzinhoz képest) még mindig kb. 5-ször nagyobb tömegű akkumulátorral oldható csak meg, aminek bekerülési költsége is tetemes.

Egyik kiváló, és ráadásul megújuló energiaforrásunk a nap, amely a repülőgép konstruktőröket is egyre jobban foglalkoztatja. Az elektromos árammá való átalakítás a jelenlegi napelemek 20% alatti hatásfokával ugyan szerény eredmény, de történt már itt is néhány sikeres kísérlet.

Az első rekordot – 4 óra 41 percet levegőben töltő – 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



2. kép A Solar 1 már 1979-ben napenergiával repült [3]



3. kép „Sunseeker II” napenergiát használó, pilótával repülő motoros vitorlázó [5]

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. [4] A 247

mérföldes nonstop repülése egyelőre világrekord emellett a 16 600 lábas magassági rekordot is Ő tartja.

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.



4. kép Eric Raymond a napelemek alkalmazásáról tart előadást [6]

Eric Raymond több sikeres európai túrarepüléssel [7] 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.

Roman Sušnik munkássága is tanulságos. Először vett egy APIS ultrakönnnyű vitorlázót KIT-ben és 2004-ben a friedrichshafeni kiállításon – a „nagyok” mellett – megjelent a kefes 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 – az idei 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.



5. kép A Pipistrel gyár két elektromos hajtású modellje a Taurus és az Apis Electro Bee

A szegedi Vitorlázó Világbajnokságon már találkozhattunk másik két szlovén feltaláló Luka és

apja Matija Žnidaršič ragyogó megoldásával a FES – Forward Electric Sustainer – azóta már önálló feszállást is bemutató – elektromos hajtással. Mindketten a modellezőként kezdték, majd a vitorlázó repülés következet és a több-ezer óra tapasztalat után a litván LAK-17B villamosítósa meghozta a sikert, a gép a patinás „Sportine Aviacija” gyár élvonalbeli terméként vált.



6. kép FES az Aero 2010 –en mutatkozott be Friedrichshfenben [8]

A „felnagyított modellező légszár” az orrkúpban sokkal kevesebb gondot okoz, mint a törzsbe rejtett társaik, amelyeket hosszas nyitogatás után lehet csak üzembe helyezni. A légeleállítás 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. [9]

A „nagyon nagyok” összehasonlíthatatlanul jobb körülmények között, a legújabb anyagok és technológiák birtokában – az űrtechnika színvonalán – fejlesztik a jövő elektromos repülőit. A több kutató fejlesztő intézet erőforrásaival – NASA támogatással – épülő napelemes repülőgépek sorra döntögetik a táv-, időtartam-, magassági rekordokat. A Pathfinder, Centurion, Helios nyitotta a sort, a „nappali repülésben” pilóta nélküli (Unmanned Air Vehicle – UAV) változatokkal.



7. kép A „Pathfinder” elérte a 24470 méteres magasságot [10]

Az európai összefogással megépült „Solar Impulse” is az egyik ilyen példája a fizika és a legújabb technológia párharcának – melyben az utóbbinak kell folyamatosan javulnia. A gép szárnymérete megközelíti a Boeing 777 utasszállítóét (61,4 m) a mindössze egy pilótára ter-

vezett kabin berendezése – a tömeg csökkentése érdekében – meglehetősen spártai. A fejlesztők terve, hogy 2013-14-ben, öt állomás közbeiktatásával körberepüljék a Földet. [11]



8. kép A „Solar Impulse” 2011. májusban már megtette a Brüsszel-Párizs távolságot [12]

Az energiacellák egyre nagyobb reményt keltenek a jobb tömeg/teljesítmény arány eléréséhez. A nagyon komoly gazdasági érdekelttségű kutatások naponta érnek el biztató sikereket. Ennek ellenére kiforrott, az általános repülésben széles kör számára elérhető energiaforrás még nem kapható.

ZÁRÓ GONDOLATOK

Írásunk a repülést szeretők, az iránt érdeklődők számára készült, korántsem a teljesség igényével. Az elektromos hajtóművek kényelmes, csendes, biztonságos alternatívát jelentenek a motoros repülésben. A kisgépes repülésben már bizonyította alkalmasságát – a hazatérő/felszálló vitorlázó segédmotorok területén. A jelenlegi technológiával tárolt, a fedélzeten előállított és a megújuló forrásokból nyert energia mérlege még nem teszi lehetővé a tartós repüléseket, de a kutatások naponta jelentenek biztató eredményeket. Amint a technika más területein, a repülőgépek elektromos meghajtási rendszereiben is a találékonyság, az új megoldások bátor keresése hozza meg az eredményt – erre biztatva az olvasókat:

KÉK EGET, JÓ LESZÁLLÁST!

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] <http://www.ulpower.net/images.html>
- [2] <http://www.enstroj.si/Electric-products/emrax-motors.html>
- [3] <http://www.ruppert-composite.ch/english/images/solair1.jpg>
- [4] <http://solar-flight.com/>
- [5] <http://www.solar-flight.com/press.html>
- [6] <http://www.solar-flight.com/speach.jpg>
- [7] <http://www.solar-flight.com/news.html>
- [8] <http://www.front-electric-sustainer.com/photo.php>
- [9] http://www.youtube.com/watch?v=zRQvwst-hTE&feature=mfu_in_order&list=UL
- [10] <http://www.blazingwings.org/entry/top-12-solar-powered-aircrafts/>
- [11] <http://www.eumozaik.hu/trendi/technika/solar-impulse-napelemekkel-foeld-koeruel>
- [12] <http://www.aviationnews.eu/2011/05/12/1st-international-flight-by-solar-impulse/>