

KORSZERŐ ELEKTROMOS PROPULZIÓ RENDSZEREK A REPÜLÉSBEN

OVERVIEW OF CUTTING EDGE ELECTRIC PROPULSION SYSTEMS IN AVIATION

Kis Dávid ^{1*}, Papp János ², Kereszty Balázs ²

¹ Anyagtechnológia Tanszék, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Neumann János Egyetem, Magyarország

² Járműtechnológia Tanszék, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Neumann János Egyetem, Magyarország

Kulcsszavak:

propulzió
hibrid
akkumulátor
tüzelőanyag-cella (PEFC)
Ragone-diagram

Keywords:

propulsion
hybrid
battery
fuel cell (PEFC)
Ragone Diagram

Cikktörténet:

Beérkezett: 2017. szeptember 27

Átdolgozva: 2017. október 4.

Elfogadva: 2017. október 24.

Összefoglalás

Az elmúlt 10 évben a fenntartható légi közlekedés érdekében számos nemzetközi szabályozás jött létre, amelyek hamarosan megújítják a repülés technológiáját. Az egyik legismertebb tanulmány, az AGAPE 2020 a propulziós rendszerek fejlesztését kiemelten kezeli. A csökkentett vagy zéró károsanyag-kibocsátású propulzió a hajtáslánc valamilyen szintű villamosítása nélkül elképzelhetetlen. Cikkünkben azokat az energiaforrásokat és/vagy energia-átalakítókat részletezzük, amelyek alkalmasak lehetnek a nagy energia- és teljesítménysűrűségű villamosított repülőgépek kialakítására.

Abstract

In the past 10 years many international regulations have been made in order to achieve sustainable air transport, which will soon reform aviation technologies. AGAPE 2020 - one of the most famous projects in the field - highlights the need of urgent propulsion system development. The electrification of aircraft drivetrains is required to reach zero or low pollutant emissions. Possible state-of-the-art energy sources and converters of aircrafts with high specific energy and specific power are collected in this article.

1. Bevezetés

Az Európai Bizottság által kiadott Flightpath 2050 [10] jelentésben ismertették, hogy 2050-re a légi közlekedés CO₂ kibocsátását utas kilométerenként 75%-kal csökkenteni kell a 2000-es év statisztikáihoz képest. Az Európai Repüléskutató Tanácsadó Testület (ACARE) számszerűsítette a rövidtávú, azaz 2020-as célokat a Vision 2020 és AGAPE 2020 [3] tanulmányokban: a zaj- és CO₂ kibocsátásnak 50 %-kal, a NO kibocsátásnak 80 %-kal kell csökkennie. A kibocsátás csökkentésében kiemelt fejlesztési célterületeket az alábbiakban kategorizálták: sárkány, propulziós- és hajtásrendszer (PPS, propulsion and power system), légiforgalmi irányítás, légítársasági műveletek [3,4]. A SRIA (Strategic Research & Innovation Agenda) [11] dokumentumban megfogalmazták a középtávú célokat, amiben a légiflották megújulásának első mérföldköveként 2035-t jelentették be. 2035-re realizálódnia kell a valamilyen mértékben villamosított kontinentális repülésnek. 2040-re megjelennek a 10 MW feletti teljesítményű villamosított propulziós rendszerek. A SRIA a 2050-re előírt 75 %-os CO₂ kibocsátás

* Kis Dávid. Tel.: +36 70 5843076
E-mail cím: kis.david@gamf.uni-neumann.hu

csökkentésnek 68 %-át a sárkány és a propulziós rendszer (PPS) fejlesztésében látja, a maradék 7 % az egyéb műveletek fejlődéséből adódik. Az is kiderült, hogy a hőerőgép alapú propulziós rendszerek erőteljes fejlesztése mellett is maradna 10-15 % az előírtból. Ez előrejelzi, hogy a propulzió villamosítása elkerülhetetlenné válik a normák 100 %-os teljesítéséhez [2,4].

Különböző tanulmányokban [1,2,5,11] rávilágítottak, hogy a jövő repülőgép fejlesztés fő hangsúlya a PPS területén végzett kutatásokon lesz. Két fő fejlesztési irány látszik kibontakozni az alacsony- illetve zéró-kibocsátású hajtástechnológiában: hibrid elektromos és az tisztán elektromos propulzió (U-ESA, Universally-Electric System Architecture). Ez azt jelenti, hogy bármely kutatásnak, amely a kibocsátás és zaj csökkentés kérdéskörével kapcsolatos, foglalkoznia kell a propulziós rendszerek villamos fejlesztésével.

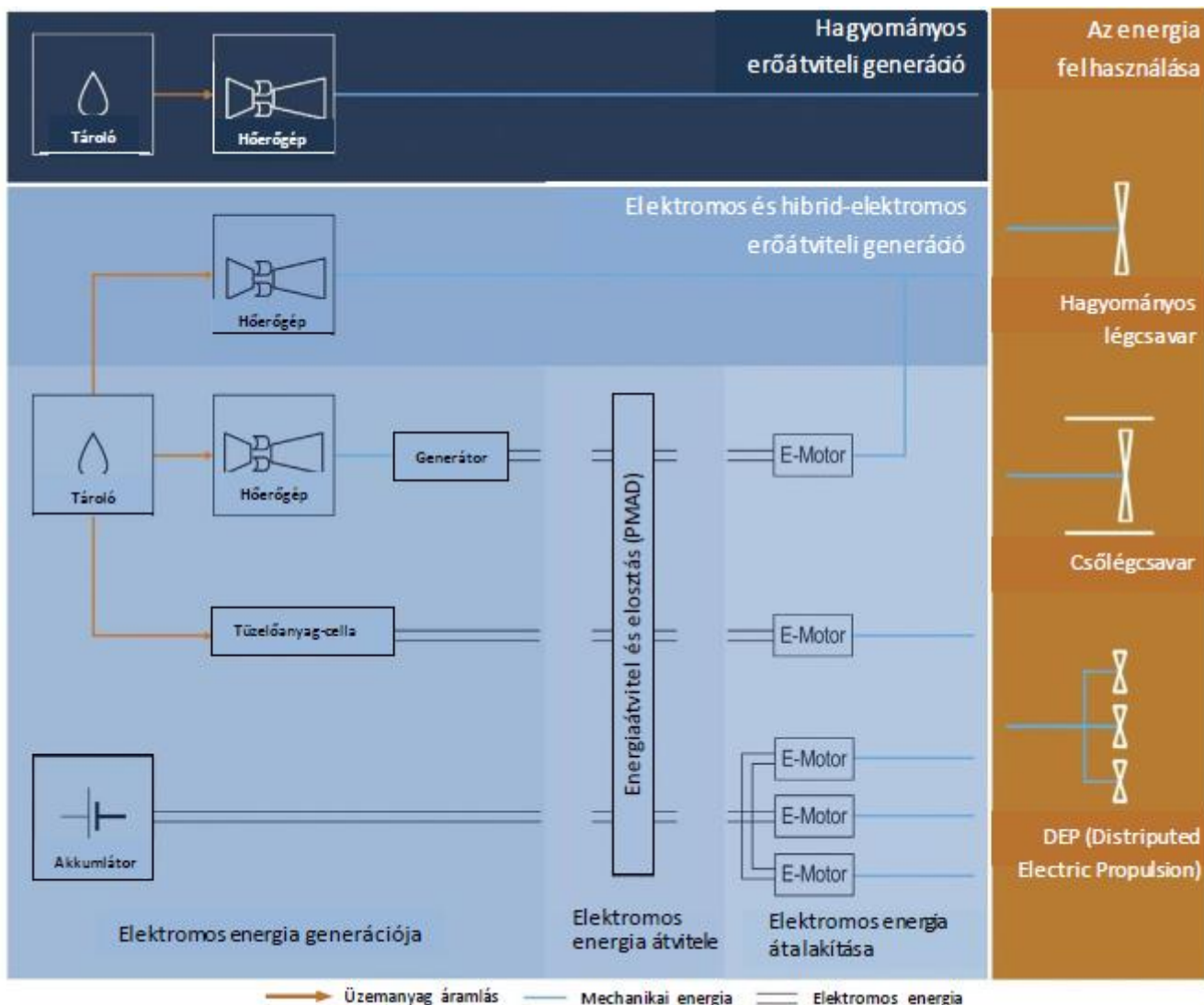
A nagy méretben megvalósított magas energia- és teljesítménysűrűségű repülő fejlesztéséhez kis lépésekben lehet eljutni, például kisrepülő villamosításán keresztül [6]. Erre mutat jó példát a Siemens és a kecskeméti székhelyű magyar vállalkozás, a Magnus Aircraft által közösen fejlesztett eFusion névre keresztelt tisztán elektromos kisrepülőgép (1. ábra).



1. ábra Az eFusion, a Siemens-Magnus közös fejlesztésű kétüléses kisrepülő tisztán elektromos hajtással [9]

Az eFusion 2016-ban repülte első hivatalos útját. Természetesen számos tisztán elektromos repülőgépet lehet még felsorolni világszerte az eFusion elődjekén. A leghíresebbek közül néhány: Militky MB-E1 (1973), Pipistrel Aircraft Taurus Electro (2007), Solar Impulse (2009) [2]. A tisztán elektromos technológia legnagyobb hátránya az alacsony energiasűrűség és az erősen korlátolt hatótáv.

Ehhez képest a hibrid-elektromos hajtásláncok különböző energiahordozó és energiaátalakító konfigurációk sorozatát teszik lehetővé, amelyekkel ez a hátrány kiküszöbölhető. A hagyományos, elektromos, és növelt hatótávú hibrid hajtásláncok repülőgépekben megvalósítható elvi szerkezetét a 2. ábra foglalja össze.



2. ábra A hagyományos, a hibrid elektromos és a tisztán elektromos propulziós rendszer architektúrák lehetőségei (PMAD (Power Management and Distribution System) azok az eszközök, amelyek összekapcsolják az energia termelő eszközöket az energia fogyasztókkal.)^{*}

2. Elektromos eszközök

Ahhoz, hogy végrehajthassuk egy elektromos vagy hibrid repülőgép koncepciótervezését, alapjaiban meg kell értenünk a lehetséges építőelemek működését és képességeit. A különböző hajtáslánc komponensek teljesítmény, hatásfok adatait gyűjti össze az 1. táblázat (2010 és 2035).

^{*} [2] alapján saját szerkesztésű ábra

1. táblázat A hibrid hajtásrendszerek alkotóelemeinek tulajdonságai (teljesítmény, hatásfok) *

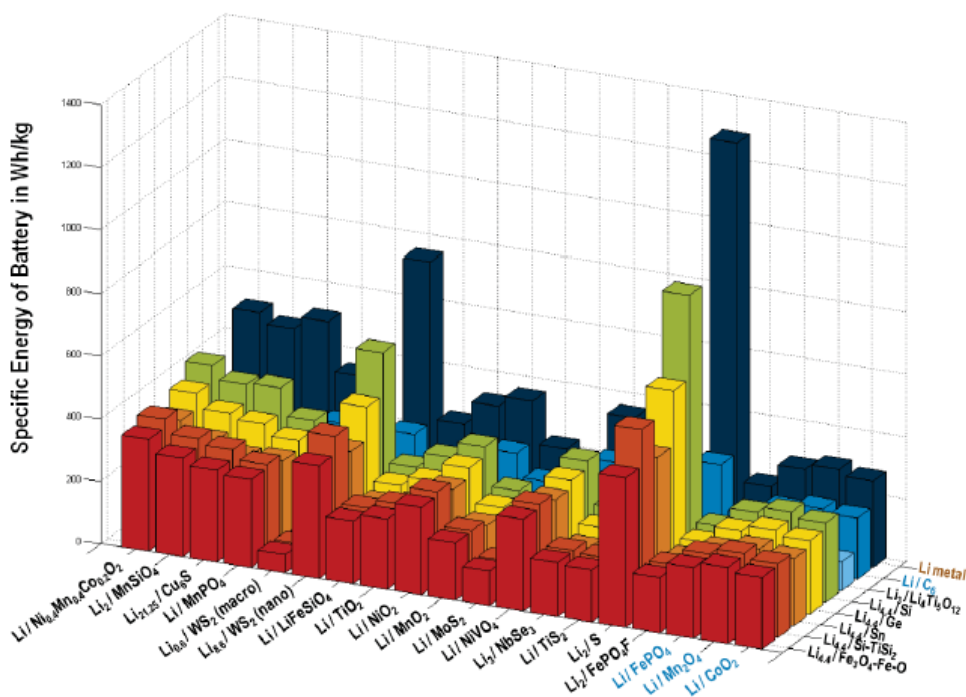
Komponens	Egység	2010	2035+
Lítium akkumulátor	kWh/kg	0.60	1.0
Turbó motor	kW/kg	15.0	18.0
Tüzelőanyag-cella (PEFC)	kW/kg	1,2	3.0
Generátor	kW/kg	10.0	30.0
Elektromotor	kW/kg	10.0	30.0
PMAD	kW/kg	10.0	20.0
Hatásfok		2010	2035+
Turbó motor		0.50	0.55
Tüzelőanyag-cella (PEFC)		0.50	0.65
Generátor		0.99	0.99
Elektromotor		0.99	0.99
PMAD		0.95	0.98

2.1. Akkumulátorok

Az akkumulátorok fejlesztése a legmeghatározóbb alapja a légi közlekedés villamosításának. Az akkumulátorok olyan energiaforrások, amelyek egyben energia átalakítók is. Ma a legígéretesebb akkumulátor technológia a lítium (Li)-ion, magas kapacitása és energiasűrűsége miatt. Az akkumulátorok működése során a lítium-ionok az elektrolitban diffúzió útján terjednek. A diffúzió útja, ideje azok a paraméterek, amelyek meghatározzák egy akkumulátor teljesítményét, karakterisztikáját, töltési idejét. A diffúziós út csökkentése az elektródák nano nagyságrendűvé miniatürizálásával lehetséges [7]. Számos cég jött létre kifejezetten nanorészecskékből felépülő elektródák fejlesztésére, például A123Systems, Altair Nanotechnologies [8].

A ma használatos kereskedelmi Li-oxid és grafit elektródás akkumulátorok maximális energiasűrűsége 300 Wh/kg, az ezzel eddig elért maximális repülési idő kisrepülőgépeknél 3 óra [6]. Az akkumulátorok teljesítményének és élettartamának növelése érdekében új elektróda anyagok fejlesztésére van szükség. Kuhn és társai [7] a 3. ábrán összegyűjtötték számos különböző pozitív és negatív elektródapárokból álló akkumulátorok elméleti potenciális energiasűrűségét.

* [6,7] alapján saját szerkesztésű ábra



3. ábra Különböző lehetséges pozitív és negatív elektródapárok energiasűrűsége [7]

A legkorszerűbb technológiákat késsel emelték ki. A fémes lítiumból álló negatív elektróda minden kombinációban a leghatékonyabb (sötétkék sor), de tűzveszélyessége miatt nem alkalmas a használatra. A legígéretesebb negatív elektróda anyagok a szilícium (Si), germánium (Ge), ón (Sn) és a titán (Ti) – szilícium nano elektródák. A pozitív elektródaanyagok közül kiemelkedő a kén (S), a nano-struktúrált volfrám-diszulfid (WS₂) és nikkelt-mangán-kobalt-oxid (Ni_yMn_yCo_{1-2y}O₂). Ezen elektróda párok teljesítménysűrűsége jóval a 300 Wh/kg felett van. Az összeállított akkumulátor szinten a cellák teljesítménye és energiája az elektróda párok alkatrész szintű értékeinél mindig alacsonyabb a teljes cellán keletkező veszteségek miatt.

2.2. Szuperkondenzátorok

Az EDLC (electrochemical double layer capacitors) szuperkondenzátorok magas teljesítmény sűrűségűek 20 kW/kg, de a tárolt energiájuk alacsony, mindössze 6 Wh/kg körüli. A kondenzátorok működési elvéből adódóan az elektromos teret létrehozó elektróda felületek növelése kulcsfontosságú fejlesztési irány. A nano méretű kialakítás nagyságrendekkel javíthatja a kondenzátorok fajlagos kapacitását. Kuhn [7] említést tesz olyan szén nanocső elektródákból és folyékony dielektrikumból álló kísérleti szuperkondenzátorról, ami tárolt energiája eléri a 100 Wh/kg-ot és teljesítménysűrűsége a 110 kW/kg-ot.

2.3. Tüzelőanyag-cellák

Lorenz [6] szerint a PEFC (Polymer electrolyte fuel cell) tüzelőanyag-cellák nagy jelentőségű energiaforrások, köszönhetően a nagy teljesítménysűrűségű cseppfolyós hidrogénnek és a magas hatásfoknak. Habár a tüzelőanyag-cellákban tárolt energia relatíve magas, de kimeneti teljesítményük alacsony (lásd 2.5. fejezet). Így a tisztán üzemanyag cellás repülés nagy méretekben nem lehetséges, de kiegészítő energiaforrásként jól alkalmazható.

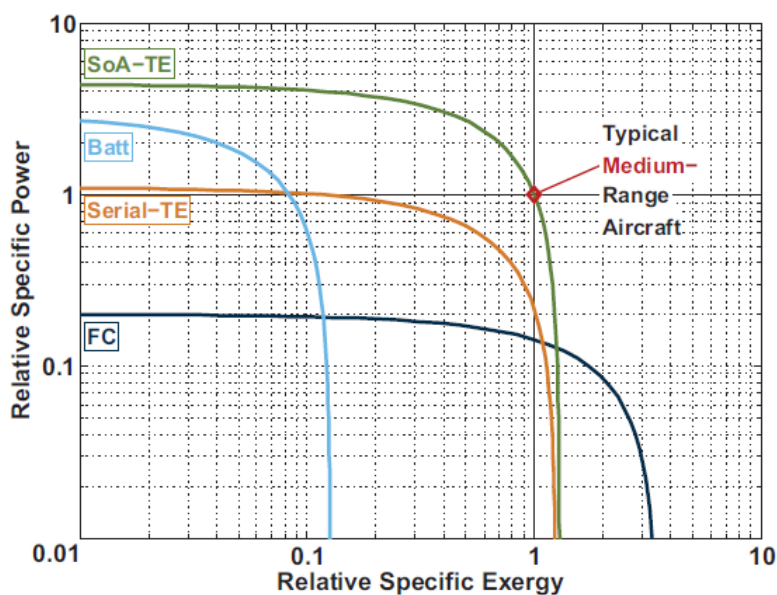
2.4. Elektromotorok

Egy hibrid hajtásrendszerben az elektromotor szerepe kritikus, hiszen létrehozza a légcsavar által a vonóerőt. A ma használatos hagyományos villanymotorok teljesítménysűrűsége 2-10 kW/kg. Érdekesek a magas átmeneti hőmérsékletű (kb. 100 K) szupravezetőkből épített motorokkal (HTS – high-temperature superconducting – motorok) elért eredmények. Ezek teljesítménysűrűsége eléri a 40 kW/kg-ot, ami magasan felülmúlja a turbó-dízel motorok értékeit.

Természetesen ez egy olyan fejlesztési irány, aminek alkalmazása sokat várható még magára a repülésben.

2.5. Ragone diagram

A Ragone diagramot eredetileg arra fejlesztették a 60-as években, hogy összehasonlítsák a különböző akkumulátor technológiákat. Független tengelyén a teljesítménysűrűséget ábrázolják, amely a rendszer vonóerejével arányos. Vízszintes tengelyén az energiasűrűség szerepel, amely a hatótávval arányos [7]. Bármilyen rendszer, mely rendelkezik energiatárolóval (pl. tüzelőanyag) és átalakítóval (pl. belső égésű motor), szintén ábrázolható a diagramon. Kuhn és társai [7] a ___ ábrán látható relatív Ragone diagram számítása során az elérhető maximális teljesítményt és tüzelőanyag mennyiséget vették figyelembe, melynek adatait a [6,7] irodalmakban publikálták.



4. ábra Különböző hajtáslánckon relatív Ragone diagramja: SoA-TE, hagyományos turbómotoros rendszer; Serial-TE, soros turbómotoros hibrid rendszer; Batt, akkumulátoros rendszer; FC, tüzelőanyag-cellás rendszer [7]

A diagramon egy piros pont jelöli egy közepes méretű repülő saccolt ideális teljesítmény- és energiasűrűségét. Teljesítmény és hatótáv (tárolt energia) szempontjából jelenleg a turbódízel motorok (SoA-TE) az elérhető legkiemelkedőbb energia átalakítók. Ugyanakkor ez a teljesítményt megdönteni látszik a közeljövőben elérhető új villanymotor fejlesztések miatt (1. táblázat). Az akkumulátor alapú tisztán elektromos rendszerek (Batt) alacsony tárolt energiával, de magas kimeneti teljesítménnyel bírnak. Ehhez képest a turbódízel-generátor alapú soros hibrid (Serial-TE) rendszerek a kiegészítők – generátor, motorok – által okozott tömegnövekedés miatt kisebb teljesítményre képesek. Ugyanakkor hatótávolságuk jelentősen jobb. Természetesen, ésszerű koncepció létezik, a hajtásrendszer optimalizálással a tömeg is csökkenthető, és a teljesítménysűrűség javulhat. Az üzemanyagcellás (FC) hajtásrendszer önmagában nem életképes propulziós rendszer, mivel a teljesítménysűrűsége alacsonyabb a repülésnél elvártnál.

3. Hibrid hajtásrendszerek

A hibrid hajtáslánckon legalább két energiahordozóból és kettő vagy több energia átalakítóból állnak. A 2. ábrán összegyűjtött elrendezések közül bemutatunk négyet.

3.1. Tisztán elektromos hajtás

A villamosított járművekbe épített akkumulátor csomag méretezése függ az elérni kívánt teljesítmény és a szükséges tárolt energia értékétől [7]. Egy tipikus tisztán elektromos hajtásban az akkumulátorok vagy magas teljesítménysűrűségeket vagy magas energiasűrűségeket, amit

megfelelő elektróda és elektrolit párosítással lehet beállítani (kivéve a nano elektródák esetén, ahol ez a korlátozás kevésbé igaz) [6]. A különböző akkumulátorok persze párhuzamosan köthetők, így egy magas energiasűrűségű és egy magas teljesítménysűrűségű akkumulátor ötvözhető egymással.

Ellentétben a hagyományos meghajtású repülőgépekkel, a tisztán elektromos légi járművek tömege nem változik repülés közben (mivel nincs elégetett üzemanyag). Az egyik legnagyobb kihívás tehát a tisztán elektromos rendszerekben a nagy akkumulátor tömeg.

3.2. Tüzelőanyag-cellás hajtás

A tüzelőanyag-cellás hajtás lineáris elrendezése a hidrogén tanktól a motorig nagyon hasonlít a hagyományos repülőgép hajtások elrendezésére. Ugyanakkor a tüzelőanyag-cellák hatásfoka nagyobb lehet a turbómotorokénál. Habár tömegcsökkenés jelentkezik a repülés alatt, ez a hidrogén kis sűrűsége miatt nem jelentős előny.

3.3. Tüzelőanyagcella-akkumulátor hybrid

A történelemben számos hidrogén meghajtású repülőgép épült már, azonban az első hidrogén-hajtású tüzelőanyag-cellás repülőgép, a Pipistrel HY4 2016-ban repült először, amit 4 db egyenként 11 kW-os üzemanyagcella és 2 db 20kWh-s akkumulátor táplált.

Ez a rendszer ötvözi a tüzelőanyag-cellák magas teljesítménysűrűségét és a nagy energiájú akkumulátorok előnyös tulajdonságait. Lehetőséget ad további előnyök kihasználására, pl. a folyékony hidrogén hűtésére használt apparátus lehetővé teszi a PMAD rendszerben a szupravezető alkatrészek alkalmazását [6].

3.4. Hőerőgép-akkumulátor hybrid

A hőerőgép-akkumulátor hybrid kialakítást tekintik a köztudatban is „klasszikus” hibrid hajtásláncnak. Az ilyen repülőgépek megvalósítására jó példa a Diamond-Siemens DA36 E-Star (2011), amely a világ első hibrid repülőjeként számon tartott kisrepülő [12].

A rendszer előnyös tulajdonsága a növelt hatótávolságban rejlik a tisztán elektromos hajtáshoz képest. A rendszer változékony kialakítást tesz lehetővé, így létrehozhatók soros vagy párhuzamos hibrid hajtásrendszerek, illetve ezek kombinációja. A hajtáslánc karakterisztikáját tovább befolyásolja a hőerőgépek széles skálája. A tervezés során nagy teljesítménysűrűségű hőerőgépre van szükség. Jó választás a turbódízel-motor, ugyanakkor a soros hibrid hajtással rendelkező DA36 E-Star generátorát például egy 30 kW-os Wankel motor hajtja. A fel- és leszállás során a DA36 tisztán elektromosan repül, így a lakott területet nem szennyezi CO₂ kibocsátással és zajjal [12].

4. Összefoglalás

Az óvatos repülőgépiparban lassúak a változások, apró lépésenként vezetnek be a kísérleti megoldásokat a tömeggyártásba. A környezettudatos szabályozásoknak köszönhetően egyre fokozottabb a repülés villamosítása iránti igény, így gyorsulnak a diszruptív technológiai fejlesztések. A cikkünkben bemutattuk a villamosított propulzió hardvereinek fejlesztési irányait és a különböző villamosított architektúrák elvét.

Köszönetnyilvánítás

A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg. EFOP-3.6.1-16-2016-00014

Köszönet Dankó Zoltán segítségének az ábrák szerkesztésében.

Irodalomjegyzék

- [1] Wells, NASA Green Flight Challenge: Conceptual Design Approaches and Technologies to Enable 200 Passenger Miles per Gallon, American Institute of Aeronautics and Astronautics,

- [2] Pernet, Isikveren, Conceptual design of hybrid-electric transport aircraft, Progress in Aerospace Sciences 79, 2015, pp. 114–135
- [3] Muller, AGAPE PROJECT FINAL REPORT Publishable Summary, AeroSpace and Defence Industries Association of Europe, 2010
- [4] Isikveren, Pre-design Strategies and Sizing Techniques for Dual-Energy Aircraft, Aircraft engineering and aerospace technology, 2014, DOI: 10.1108/AEAT-08-2014-0122
- [5] Rao, et.al., A Hybrid Engine Concept for Multi-fuel Blended Wing Body, Aircraft Engineering and Aerospace Technology Journal, Vol. 86, Issue 6, 2014, DOI: 10.1108/AEAT-04-2014-0054
- [6] Kuhn, et.al., PROGRESS AND PERSPECTIVES OF ELECTRIC AIR TRANSPORT, 28th International Congress of the Aeronautical Sciences, 2012, ISBN 978-0-9565333-1-9
- [7] Kuhn, et.al., FUNDAMENTAL PREREQUISITES FOR ELECTRIC FLYING, Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress, 2012, DocumentID: 281440
- [8] Halmágyi, A Lithium-ion Nano technológia, Óbudai Egyetem Neumann János Informatikai Kar, 2015
- [9] Magnus: elektromosan, MTI, 2016 <http://iho.hu/hir/magnus-elektromosan-160419>
- [10] Kallas, Quinn, Flightpath 2050 Europe's Vision for Aviation, European Commission, 2011, ISBN 978-92-79-19724-6
- [11] Henke, Groot, Wachenheim, Strategic Research & Innovation Agenda, 2017 Update, Volume 1, ACARE, 2017
- [12] Martini, Lentsch, Kursell, World's first serial hybrid electric aircraft to fly at Le Bourget, 2011, AXX201106.66 e