

# KORSZERŰ ELEKTROMOS PROPULZIÓ RENDSZEREK A REPÜLÉSBEN

## OVERVIEW OF CUTTING EDGE ELECTRIC PROPULSION SYSTEMS IN AVIATION

Kis Dávid <sup>1\*</sup>, Papp János <sup>2</sup>, Kereszty Balázs <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Anyagtechnológia Tanszék, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Neumann János Egyetem, Magyarország

<sup>2</sup> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> kibocsátás

---

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

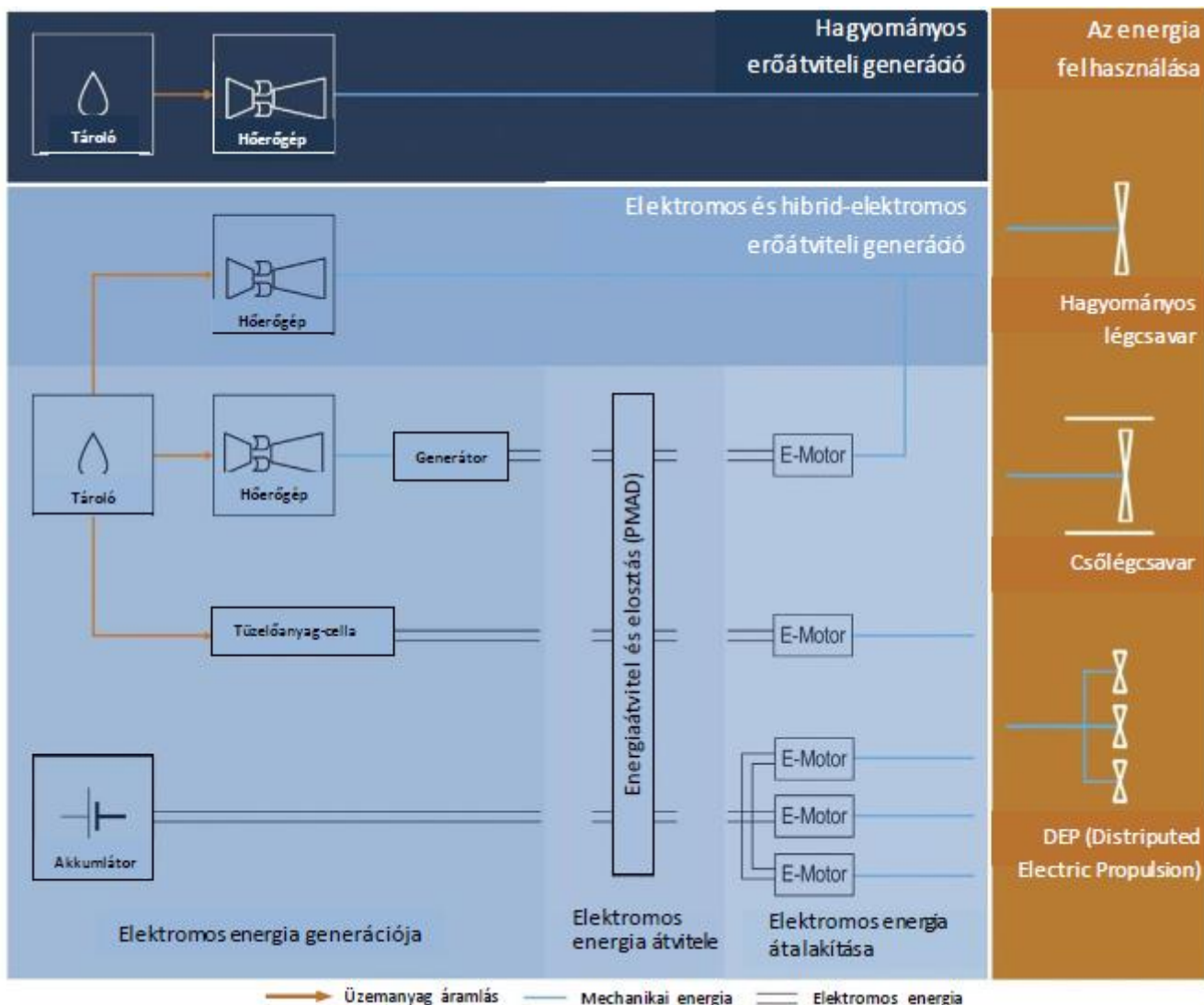
A nagy méretben megvalósított magas energia- és teljesítménysűrűségű repülő fejlesztéséhez kis lépésekben lehet eljutni, például kisrepülő villamosításán keresztül [6]. Erre mutat jó példát a Siemens és a kecskeméti székhelyű magyar vállalkozás, a Magnus Aircraft által közösen fejlesztett eFusion névre 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 világviszonylatban 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.)<sup>\*</sup>

## 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).

<sup>\*</sup> [2] alapján saját szerkesztésű ábra

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

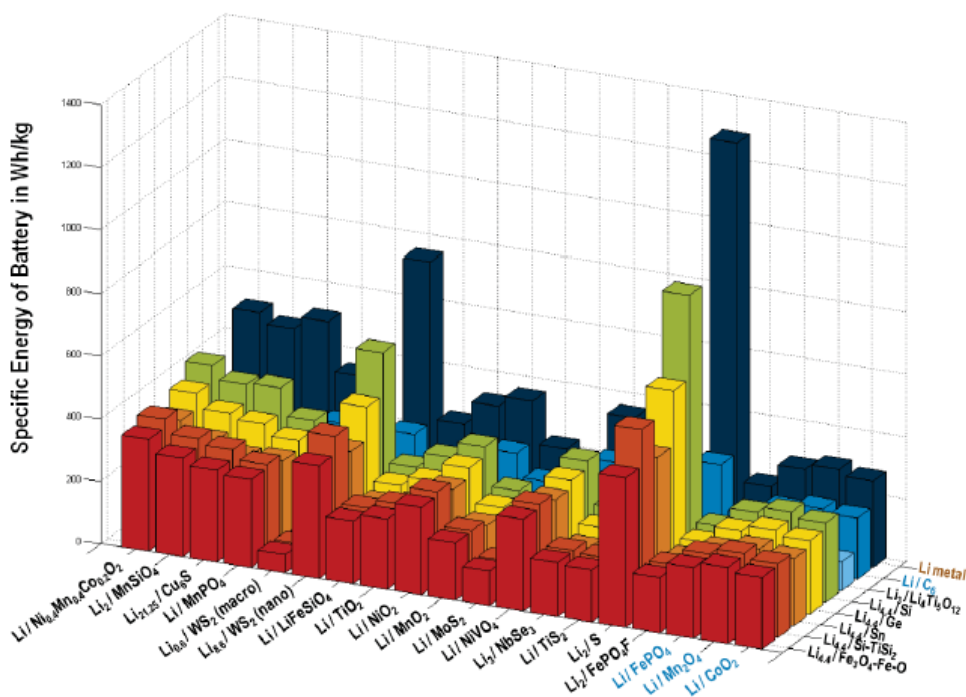
Komponens	Egység	2010	2035+
Lítium akkumulátor	kWh/kg	0.60	1.0
Turbó motor	kW/kg	15.0	18.0
Tüzelőanyag-cella (PEFC)	kW/kg	1,2	3.0
Generátor	kW/kg	10.0	30.0
Elektromotor	kW/kg	10.0	30.0
PMAD	kW/kg	10.0	20.0
<b>Hatásfok</b>		<b>2010</b>	<b>2035+</b>
Turbó motor		0.50	0.55
Tüzelőanyag-cella (PEFC)		0.50	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 (WS<sub>2</sub>) és nikkel-mangán-kobalt-oxid (Ni<sub>y</sub>Mn<sub>y</sub>Co<sub>1-2y</sub>O<sub>2</sub>). 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.

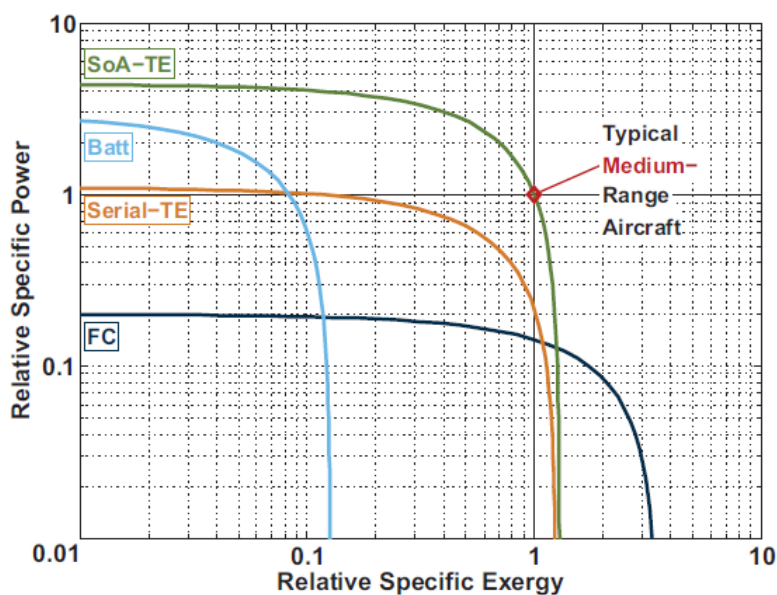
## 2.4. Elektromotorok

Egy hibrid hajtásrendszerben az elektromotor szerepe kritikus, hiszen létrehozza a légcsavar által a vonóerőt. A ma használatos hagyományos villanymotorok teljesítménysűrűsége 2-10 kW/kg. Érdekesekek 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 hajtásláncok 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 hajtásláncok 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 CO<sub>2</sub> 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