

Békési Bertold, Gajdács László, Knapiczius Attila

A pilóta nélküli légi járművek meghajtási rendszerei

A pilóta nélküli légi járműveket (UAV) megjelenésük óta számos kérdés övezi. Kétség sem fér hozzá, ezen eszközök használata megreformálta a repülést nemcsak katonai, de a civil felhasználást tekintve is. Nap mint nap számos olyan terület jelenik meg, amely hatékony működéséhez hozzájárulhat meglétük, és a 21. század kielégítő technológiai fejlettsége lehetőséget biztosít arra, hogy hatásfokukat kedvező irányba növelve új kihívások elé állíthassuk ezeket a segédeszközöket. Az ehhez szükséges teljesítmény jelentősen összefügg azzal, hogy milyen meghajtási technológiát választunk, az erre irányuló kutatások és fejlesztések így az egyik legfontosabb irányt képezik. A cikk a lehetséges meghajtási rendszereket tárgyalja, működési elvüket legfontosabb jellemzőikkel. Fontos kiemelni, milyen elvárásokat követelnek meg az adott felhasználási területek, így ezek alapján szükséges kiválasztani a megfelelő szerkezeti felépítést. Figyelembe kell venni továbbá a jövőben megjelenő potenciális kihívásokat. Egyre tágabb teret kap a tisztán elektromos meghajtás, nemcsak földön, de a levegőben is, így a rendszerek energiaellátása és annak iparága is. A cikk igyekszik átfogó nézetet adni és több szempöngből is összehasonlítani az UAV-k meghajtási rendszereit azok minden előnyével és hátrányával.

Kulcsszavak: UAV, meghajtás, akkumulátor, üzemanyagcella,

1. Bevezetés

A kis méretű pilóta nélküli légi járművek (UAV), közismert nevükön a „drónok” használata minden ágazatban növekszik. Az UAV-k olyan légi műveleteket képesek végrehajtani, amelyekkel a pilóta által vezetett repülés nehezen boldogul, és alkalmazásuk nyilvánvaló gazdasági megtakarításokat és környezeti előnyöket eredményez, miközben csökkenti az emberi élet veszélyeztetésének kockázatát [12].

Jelenleg az UAV-knak számos típusa létezik, és különböző területeken használják őket, a polgári és a katonai repüléstől kezdve. Ezért számos kritériumot javasoltak az UAV-k különböző csoportokba történő sorolására [15]. Az UAV-kat felépítésük alapján merev, forgószárnyas, hibrid és biológiai alapú kategóriákba sorolhatjuk [2], [3], [4], [5], [8]. A meghajtás módja alapján dugattyús, gázturbinás és elektromotoros [2], [3], [4], [5] megoldások lehetségesek. A [6] irodalom részletesen foglalkozik a lehetséges szerkezeti felépítésekkel, beleértve az üzemanyag-meghajtású, a hibrid (üzemanyag-meghajtású és elektromos) és a tisztán elektromos rendszert.

A pilóta nélküli légi járművek meghajtási technológiája jelentős mértékben kapcsolódik az UAV-k repülési teljesítményéhez, amely a repülés egyik legfontosabb fejlesztési irányává

vált. Az UAV tervezésénél és építésénél az egyik legfontosabb feladat, hogy a rendszer a lehető leghosszabb ideig működőképes legyen, ami az UAV élettartamának növelését jelenti. Az UAV energiatároló rendszerének kapacitáskorlátozása az UAV-alkalmazások szempontjából kulcsfontosságú műszaki kihívás [6].

Az UAV-típusok közül a mini (MAV) pilóta nélküli légi járművek kategóriája az [8, p. 302], amely talán a legszélesebb körben használhatja az elektromos motorokat és ezáltal a meghajtásukhoz szükséges különböző energiatároló rendszereket.

Az elektromos motorok, az energiatároló rendszerek és a teljesítményelektronikai átalakítók terén elért fejlesztések a repülőgépek meghajtásának egyre inkább elektromossá válását eredményezik [16]. A nagyobb teljesítményigényű repülőgépek (MEA)¹ alapkonceptiója az, hogy növeljék azon alrendszerek elektromos meghajtását, amelyek működtetéséhez a korábbi repülőeszközökön mechanikus, pneumatikus vagy hidraulikus rendszerek kombinációját alkalmazták. A MEA célja tehát, hogy teljes mértékben lecserélje a repülőgép nem elektromos erőforrásait elektromosra [9].

A repülőgépek a kezdetben kis méretű, teljesen elektromos városi légi járművekből fokozatosan közepes méretű hibrid-elektromos repülőgépekké, majd három évtizeden belül hibrid-elektromos meghajtású regionális repülőgépekké fejlődnek. A hibrid-elektromos meghajtású rendszerek tanulmányozása multidiszciplináris, kombinált megközelítést igényel, hogy megbirkózzon az összes kapcsolódó területtel, ami kihívásokkal teli feladat [16].

Jelen munka célja bemutatni az UAV-k meghajtás szempontjából fontos energiaellátó rendszerét (akkumulátor, üzemanyagcella stb.), kiemelve annak legfontosabb jellemzőit, előnyeit és kihívásait.

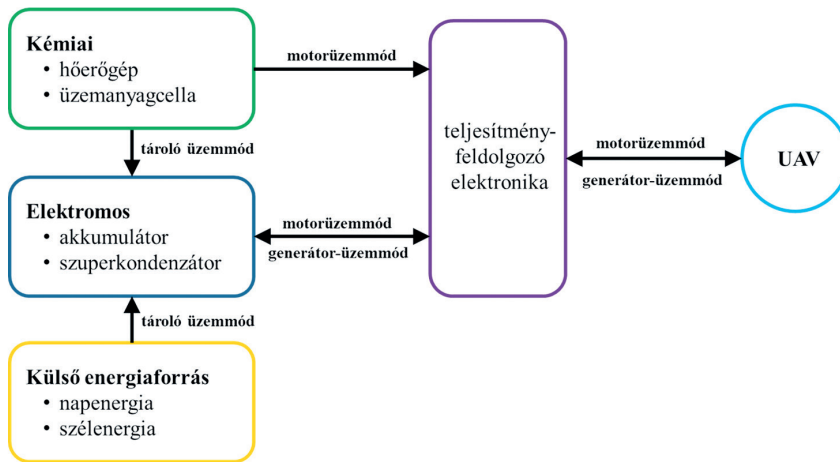
2. Az UAV-ban használt energiaforrások

Az UAV-rendszer számos különböző komponensből áll. A küldetés követelményeitől függően az UAV egyes részei cserélhetőek. Alapvetően azonban két fő rendszert tartalmaz: fedélzeti egységet és földi egységet [10], [18], amelyek a következő alrendszereket foglalják magukban: légi jármű, hasznos teher, navigáció, energiaellátás, kommunikáció, indító- és leszállító berendezések, valamint vezérlőállomás [6], [15].

Egy UAV tervezésekor a hasznos teher az egyik fontos tényező, amelyet figyelembe kell venni. A nagyobb hasznos teher befolyásolja az UAV működéséhez szükséges energiát. A hasznos teher alapvetően több típusra osztható: videokamerák, hőkamerák, érzékelők és rakományok (például fegyverek, rakéták és bombák a hadsereg számára; permetezés, vetőmagvetés, gyomfelismerés, térképezés a mezőgazdaság számára; vagy akár tűzoltó anyagok polgári célokra és így tovább) [15].

Az energiaellátó rendszer fontos szerepet játszik az UAV-ban, és a rendszer szívének tekinthető, mivel az egész „operációs rendszer” energiaellátását biztosítja. Az energiarendszer jelentős hatással van a légi jármű repülési teljesítményére. Az UAV működéséhez használt energiaforrások közé elsősorban a hőerőgép, az üzemanyagcella, a szuperkondenzátor, az akkumulátor és a külső energiaforrás (napenergia, szél stb.) tartozik. Két kategóriába sorolhatók: kémiai rendszer és elektromos megoldások (lásd az 1. ábrát) [15].

¹ More-Electric Aircraft (MEA): nagyobb teljesítményű repülőgép; több elektromos energiát igénylő repülőgép.



1. ábra

Az UAV-ban használt energiaforrások (Békési Bertold [15] alapján)

A hőerőgépet főként a nagy UAV-kban, például a HALE² és a MALE³-típusúakban használják. A hőenergiát mechanikai energiává alakítja át, amely az UAV működésének forrása. A bonyolult vezérlés, a magas hőmérsékleti jellemző, a nagy zaj, az alacsony üzemanyag-megtakarítási képesség és a segédindító motor szükségessége miatt azonban a hőerőgép nem alkalmas a kis UAV-kban való használatra [15]. A fenti problémák megoldására környezetbarát elektromos motorokat fejlesztenek ki, amelyek elektromos energiaforrásokat, például üzemanyagcellákat, napelemeket, akkumulátorokat és szuperkondenzátorokat használnak alacsony károsanyag-kibocsátásuk, alacsony zajszintjük és alacsony hőszugárzásuk miatt [23].

Az akkumulátorok az elektromos meghajtású rendszerek kulcsfontosságú elemei, mivel ezek szolgáltatják a motor és egyéb elektromos/elektronikus alkatrészek – navigáció, vezérlés, adatgyűjtés – működtetéséhez szükséges energiát [23]. Elsőre az akkumulátorok vonzóbbak lehetnek kis méretük és alacsony költségük miatt, de teljesítményük és energiasűrűségük jóval kisebb, mint a többi alternatívának [7].

Az UAV-k fedélzetén használt akkumulátorok számos különböző típusa létezik (1. táblázat), amelyek mindegyikének megvannak a maga előnyei és hátrányai [1], [11]. A típusok közé tartoznak: ólomsavas, nikkel-kadmium (NiCad), nikkel-fémhidrid (NiMH), alkáli, lítium-polimer (Li-Po), lítium-ion (Li-ion), cink-oxid (Zn-O₂), lítium-levegő és lítium-tionil-klorid⁴ (Li-SOCl₂) [1].

² High-Altitude, Long-Endurance: nagy repülési magasságú, hosszú repülési időtartamú.

³ Medium-Altitude, Long-Endurance: közepes repülési magasságú, hosszú repülési időtartamú.

⁴ A lítium-tionil-klorid-cellák (Li-SOCl₂) fém lítiumanódot (a fémek közül a legkönnyebb) és folyékony katódot tartalmaznak, amely tionil-kloriddal (SOCl₂) töltött porózus szénáramkollektorral rendelkezik. 3,6 V cellafeszültséget biztosítanak, henger alakúak. A lítium-tionil-klorid-cellák olyan eldobható elemek, amelyeknek a legmagasabb a feszültségük és az energiájuk. A leghosszabb ideig tárolhatók és a legkisebb az önkisülési arányuk. Ezek az elemek ideálisak olyan hosszú távú alkalmazásokhoz, mint az elektronikus eszközök (GPS, vészhelyzeti jeladók, katonai rádiókommunikáció), különösen a memória IC-k [19].

1. táblázat

A különböző akkumulátortípusok különböző jellemzőinek összehasonlítása [1], [11]

Típusok	Pb	NiMH	Li-ion	Ni-Cd	alkáli	Li-Po	Zn-O ₂	LiO ₂	Li-SOC ₂
Cellafeszültség (V)	2,1	1,2	3,6–3,85	1,2	1,3–1,5	2,7–3	1,45–1,65	2,91	3,5
Energiasűrűség (Wh/kg)	30–40	60–120	100–265	40–60	85–190	100–265	442	11 140	500–700
Fajlagos teljesítmény (W/kg)	180	250–1000	250–340	150	50	245–430	100	11 400	18
Élettartam	<350	180–2000	400–1200	2000	nincs adat	500	100	700	nincs adat
Töltési/kisülési hatékonyság (%)	50–95	66–92	80–90	70–90	45–85	90	60–70	93	6–94
Önkisülési ráta (%)	3–20	13,9–70,6	0,35–2,5	10	<0,3	0,3	0,17	1–2	0,08
	12 V 2 Ah	12 V 2 Ah	3,6 V 2 Ah	12 V 1,8 Ah	1,5 V 2,2 Ah	3,7 V 2 Ah	1,4 V 0,3 Ah	nincs adat	3,6 V 2,2 Ah

A drónokban a legelterjedtebb akkumulátor a Li-Po és a Li-ion. A Li-ion típusúak nagyobb energiát és teljesítményt képesek biztosítani egységnyi akkumulátortömegre vetítve. Emellett nagy energiahatékonysággal rendelkeznek, nincs memóriahatás, és a többi újratölthető akkumulátorhoz képest viszonylag hosszú élettartamúak. A Li-SOCl₂-akkumulátorok kilogrammonként kétszer nagyobb energiasűrűséggel rendelkeznek a Li-Po és a Li-ionhoz képest, a lítium-levegő-akkumulátorok pedig akár hétszer nagyobbak is lehetnek, azonban sajnos nem annyira széles körben elérhetőek és sokkal drágábbak, mint a Li-Po és a Li-ion [1].

A lítiumakkumulátorok egy másik változata a lítium-kén (Li-S),⁵ amely szintén nagyobb energiasűrűséget 2600 Wh/kg (elméleti) kínál a Li-ionnál (100–200 Wh/kg). Figyelembe véve a tényleges és az elméleti energia közötti arányt, a Li-S-akkumulátorok gyakorlati energiasűrűsége várhatóan eléri a 800 Wh/kg-ot, ezért a Li-S-akkumulátorok a következő generációs akkumulátortechnológia termékeinek tekinthetők, amelyek alkalmazási lehetőségei igen jelentősek [14]. A legtöbb fejlett ország, köztük az Egyesült Államok, Japán, Oroszország, Kína és az Európai Unió határozottan támogatja a Li-S-akkumulátor-technológia fejlesztését.⁶ Eközben a kereskedelmi Li-S-akkumulátorok kutatása és fejlesztése terén világszerte jelentős előrelépéseket tettek, többek között olyan vállalatok, mint a Sion Power (USA),⁷ a Polyplus (USA) és az Oxis Energy (UK) [14].

⁵ Herbert Danuta és Ulam Juliusz 1962-ben szabadalmaztatta [13] az elemi kénnek az akkumulátor katódanyagaként való felhasználását, amely a Li-S-akkumulátorok eredetének tekinthető.

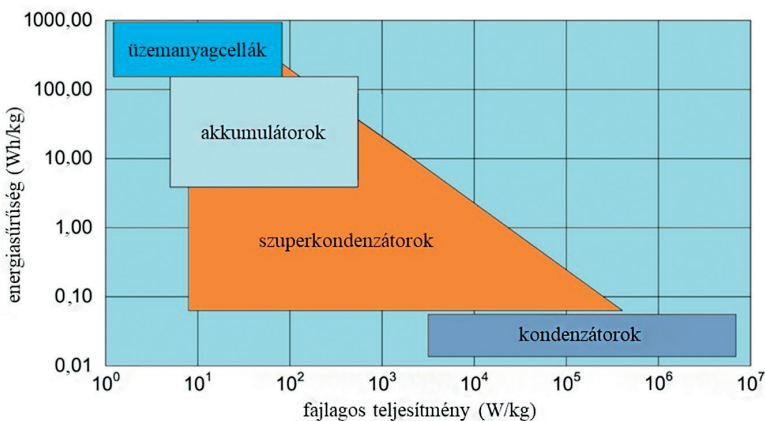
⁶ Japán évi 30 milliárd jen (kb. 2,4 milliárd kínai jüan) befektetését tervezte, és a cél az 500 Wh/kg speciális energiájú Li-S-akkumulátorok kifejlesztése volt 2020-ra. Az EU 2015-ben megnyitotta a „Horizont 2020” kutatási és fejlesztési programot, amely 7,6 milliárd dollárt tervezett befektetni a Li-S-akkumulátorokat használó elektromos járművekbe.

⁷ 2014-ben a Sion Power Company bemutatta a napközben napelemmel, éjszaka pedig Li-S-akkumulátorral (350 Wh/kg) működő pilóta nélküli légi járművet [21]. A Zephyr névre keresztelt HALE UAV (szárnyfesztávolsága 22,55 m és tömege 53,07 kg) 14 nap 22 percet töltött a levegőben [7]. Ezt a figyelemre méltó rekordot a napenergia és a Sion Power Li-S-akkumulátorainak éjszakai kombinációjával érte el [21].

Az egyes kritériumok (lásd 1. táblázat) a drón különböző aspektusait befolyásolják: a teljesítménysűrűség a gyorsítási képességeket, az energiasűrűség a hatótávolságot, az élettartam azt, hogy milyen gyakran kell cserélni az akkumulátort, a tömeg és a térfogat pedig a rendszer hatótávolságát [1].

Az elektromos energiaforrások másik lehetősége az üzemanyagcella, amely egy galván-elem és az üzemanyag kémiai energiáját alakítja át villamos energiává [7], [15]. Az üzemanyagcellák működésük során nem juttatnak a környezetükbe olyan káros anyagokat, mint a hagyományos tüzelőanyagok (nitrogén-oxidok, kén-dioxid, illetve lebegő részecskék), így akár környezetbarátok is nevezhetők (lennének). Viszont a hidrogénbetáplálásuk vízgőzt bocsátanak ki magukból, amely a magasabb légrétegekben, ahol a légi járművek közlekednek, hozzájárul az üvegházhatáshoz. Ezenkívül a működéshez szükséges hidrogén előállításuk jelenleg döntő hányadában nem környezetbarát technológiákkal, fosszilis eredetű energiahordozók felhasználásával történik (például gőz-, katalitikus reformálás, elektrolízis), ami így kizárja a H_2 környezetbarát besorolását [7], [17].

A 2. ábrán látható, hogy az üzemanyagcella rendelkezik a legnagyobb fajlagos energiával, míg a fajlagos teljesítmény a legalacsonyabb a többi energiaforráshoz képest. Mindegyik energiaforrásnak megvannak a maga előnyei és hátrányai, ezért sok kutató arra is törekedett, hogy ezeket az energiaforrásokat előnyeikkel kombinálva hibrid energiaforrásokat hozzon létre. Hibrid energiaforrás lehet például egy akkumulátor és egy üzemanyagcella kombinációja, amely kihasználja az akkumulátor nagy teljesítménysűrűségét, nagy hatékonyságát, gyors reakciókészségét és az üzemanyag nagy energiasűrűségének előnyeit. Ebben az esetben az akkumulátort használják energiaforrásként a csúcsteljesítmény igénybevételéhez, például a felszálláshoz és az emelkedéshez. Emellett az üzemanyagcella az utazó- és süllyedési fázisban is használható [15].



2. ábra
Energiaforrások összehasonlítása (Békési Bertold [15] alapján)

Az akkumulátorok ezen hátrányainak ellensúlyozására a szuperkondenzátorok használata jöhet szóba, az akkumulátoroknál ezek sokkal nagyobb teljesítményű és gyorsabb energiátároló rendszerek (gyorsabb töltési/kisütési sebesség). A szuperkondenzátor továbbá észszerű

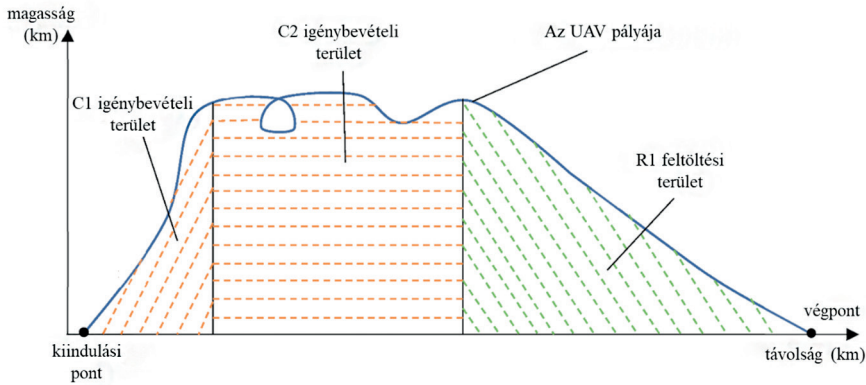
költséggel, nagy üzemi hőmérséklet-tartományban és alacsony karbantartási költséggel rendelkezik, és csökkenti az egyenáramú buszfeszültség ingadozását. Az akkumulátorokénál azonban a szuperkondenzátorok fajlagos energiakapacitása alacsonyabb (csak néhány Wh/kg). A szuperkondenzátorok közül az elektromos kétrétegű kondenzátorok a legelterjedtebb típusok, amelyek nagyon tartósak, és képesek gyors töltésre és kisütésre, valamint több millió ciklusra. Az ilyen típusú szuperkondenzátorok használata környezetvédelmi előnyökkel is jár, mivel nem igényelnek drága anyagokat, például lítiumot és kobaltot a gyártásukhoz [15], [20].

Egy másik alternatívát jelenthetnek a lítium–levegő-akkumulátorok, amelyek jelentősen megnövelhetik az elektromos (légi) járművek hatótávolságát, mivel nagyon nagy energiasűrűséggel (fajlagos energiával) rendelkeznek, amely szinte a kerozinéhoz hasonlítható [1]. Egy kg kerozin körülbelül 43 MJ energiát (11,94 kWh) tartalmaz [22]. Ugyanazzal a tömeggel 5–10-szer annyi energiát képesek tárolni, mint a Li-ion-akkumulátorok, vagy ugyanolyan térfogat mellett kétszer annyi energiát. Összehasonlításképpen: becsült energiasűrűségük 2000–3500 Wh/kg körül van (gyakorlati energiasűrűségük várhatóan eléri az 1700 Wh/kg-ot) [14], ami sokkal nagyobb, mint bármely más ismert akkumulátoré. Már terveztek kis méretű lítium–levegő-akkumulátort, amelynek sűrűsége 600 mAh/g, szemben az azonos méretű Li-ion-akkumulátor 100–150 mAh/g sűrűségével [1]. Mindezen előnyök mellett néhány hátránnyal is számolni kell, ennek az akkumulátornak az újratölthető változata problémás, mivel az újratöltési/kisütési ciklusok száma nagyon korlátozott, újratöltési sebessége nagyon lassú, és rendkívül veszélyes, ha az oxigénben vízgőz van jelen, mivel a lítium heves reakcióba lép vele [1].

Összefoglalva: a mai korszerű akkumulátorok legnagyobb fajlagos energiája kb. 400 Wh/kg. Tehát a kerozin fajlagos energiája körülbelül 30-szor nagyobb, mint a rendelkezésre álló akkumulátorok fajlagos energiája. Az elfogadható szint körülbelül 750 Wh/kg lenne, amely nem lesz elérhető 2035 előtt [22].

3. Egy UAV repülési forgatókönyve

Az energiarendszer jelentős hatással van a légi jármű repülési teljesítményére. Ha ismerjük az UAV röppályáját, akkor ennek ismeretében kiszámítható a repüléshez felhasznált energia. A 3. ábra egy UAV repülési forgatókönyvét mutatja be. A kiindulási ponttól a végpontig tartó repülés során az UAV sok energiát fogyaszt a C1 és a C2 területen, és az R1 területen a szélenergiát elektromos energiává alakítva tárolja vissza az energiát. Az UAV hatékonysági együttthatójának (hatásfokának) maximalizálására irányuló cél elérése érdekében meg kell találni a szélenergia elektromos energiává történő átalakításának hatékony együttthatóját. Mivel az UAV-t befolyásolják a környezeti tényezők és a motorok változó sebessége, az UAV energiafogyasztási modellje valójában nemlineáris modell. Az energiafogyasztási modell a sok figyelembe veendő paraméter miatt összetetté válik. Célunk azonban a maximális hatékonyság megtalálása, ezért az energiafogyasztási modellt lineárisnak tekintjük [15].



3. ábra

Egy UAV repülési forgatókönyve (Békési Bertold [15] alapján)

Az UAV energiafogyasztása elsősorban a meghajtórendszerre koncentrálódik. A motoron átfolyó áram nagyon nagy, ezért a quadrokopter általában rövid üzemidővel rendelkezik. A meghajtási energiafogyasztás a következőképpen számítható ki:

$$E_{pr} = \int_{t_0}^{t_f} \sum_{i=1}^4 \left(J \dot{\omega}_i(t) + K_T \omega_i^2(t) + D_v \omega_i(t) \right) \omega_i(t) dt \quad (1)$$

ahol: ω_i – az i motor szögsebessége; J – a motor tehetetlensége; D_v – a viszkózus csillapítási együttható; és K_T – a légellenállási együttható.

A szélenergiából átalakított energia a következő képlet szerint számítható ki:

$$E_c = \int_{t_2}^{t_1} \eta_0 P_w(t) dtz \quad (2)$$

ahol: η_0 – a szélenergia elektromos energiává történő átalakításának hatékonysági együtthatója és P_w – a szélenergia.

Az UAV teljesítménye az energiaátalakítás és az energiafogyasztás között a következőképpen számítható ki:

$$\eta = \frac{E_c}{E_{pr}} \quad (3)$$

Az (1) és a (2) egyenletből látható, hogy az UAV energiafogyasztása nagymértékben függ a motorok szögsebességétől. Nagyon fontos az elektromos motorok áramának vagy a rendszer elektromos meghajtásának szabályozása. Ezeknek az elektromos meghajtásoknak a hatékonyságát az áram szintje befolyásolja. Eközben az energiaátalakítást a η_0 és a légcsavár keresztmetszetén keresztül a szélenergia befolyásolja [15].

4. Összefoglalás

A repülőgépek elektromos meghajtása hatással lesz a repülőterek légi közlekedésére. A skandináv országok a fenntartható légi közlekedés irányába mutatnak, és 2045-ig a rövid távú járatok és a belföldi járatok esetében 100%-ban elektromos légi közlekedés megvalósítását tűzték ki célul. Erre az időre azért van szükség, mert az elektromos repülőgéphez töltési szabványok, új infrastruktúra és új üzleti modellek meghatározása szükséges. Az elektromos repülőgépek elterjedésével a repülőgépek karbantartási költségeinek 50%-os csökkenése várható, valamint az üzemanyagköltségek megtakarítása [16].

Az UAV-k energiaellátásának legnépszerűbb módját jelenleg az akkumulátorok jelentik. Az akkumulátorok UAV-kban való alkalmazása során a következő főbb kihívások merülnek fel:

1. a nem megfelelő fajlagos energia és teljesítménysűrűség (az önálló elektromos meghajtási tartomány elérése érdekében);
2. az akkumulátorok nem megfelelő élettartama (töltés-kisütés ciklusok) és
3. a nem megfelelő biztonság, a termikus instabilitás, a hosszú töltési idő [11], [22].

Az üzemanyagcellát energiaforrásként használó UAV előnyei közé tartozik, hogy nincs közvetlen környezetszennyezés, nincs zaj, nagy az energiasűrűség, és szinte azonnal feltölthető. A hátrányok azzal kapcsolatosak, hogy a méret jelentősen nagyobb, mint a hagyományos akkumulátorral működő drónoké, az üzemeltetési költségek a hidrogéngáz rendelkezésre állásától függenek, és a hidrogéngáztartály mérete korlátozza a drón felépítését. Továbbá a hidrogéntartályt figyelembe kell venni a drón kiegyensúlyozásakor, szem előtt tartva, hogy tömege csökken, amint a tartály kiürül [1].

A tanulmány célja az volt, hogy röviden összefoglalja az UAV-k meghajtása szempontjából fontos energiaellátó rendszereket (akkumulátor, üzemanyagcella stb.), kiemelve azok legfontosabb jellemzőit, előnyeit és kihívásait. Konklúzióként elmondható hogy a jelenlegi technológiák fokozatos fejlesztése nem lesz elegendő a kitűzött célok eléréséhez, úgynevezett „diszruptív” változtatásra van szükség. A problémák enyhítése további tanulmányokat és technológiai fejlesztést igényel. A hibrid-elektromos meghajtás, az új technológiák, konfigurációk és megoldások tűnnek a legvalószínűbb megoldásnak a célok eléréséhez.

Felhasznált irodalom

- [1] A. Townsend et al., „A Comprehensive Review of Energy Sources for Unmanned Aerial Vehicles, Their Shortfalls and Opportunities for Improvements,” *Heliyon*, 6. évf. 2020. Online: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05285>
- [2] Békési B., „Pilóta nélküli légijármű típusok sárkányszerkezeti megoldásai,” in *Műszaki Tudomány az Észak-kelet Magyarországi Régióban 2013*, Pokorádi L. szerk. Debrecen, Magyarország: Debreceni Akadémiai Bizottság Műszaki Szakbizottsága, 2013, pp. 122–132.
- [3] Békési B., „Pilóta nélküli légijárművek jellemzése, osztályozásuk,” in *Pilóta nélküli repülés profiknak és amatőröknek*. Palik M. szerk. Budapest, Magyarország: Nemzeti Közszolgálati Egyetem, 2013, pp. 65–109.
- [4] Békési B., „UAV-k sárkányszerkezeti megoldásai,” *Szolnoki Tudományos Közlemények*, 15. évf. pp. 1–11. 2011.

- [5] Békési L., Békési B., „Merevszárnyú pilóta nélküli légitáncművek (UAV-k),” Szolnoki Tudományos Közlemények, 17. évf. pp. 7–34. 2013.
- [6] Békési B., Gajdács L., Knapiczius A., „Drónok meghajtás szerinti lehetséges szerkezeti felépítései,” Repüléstudományi Közlemények. 1. sz. pp. 257-274. 2023. Online: <https://doi.org/10.32560/rk.2023.1.18>
- [7] Békési B., Juhász M., „Pilóta nélküli légitáncművek energia forrásai,” *Economica*, 7. évf. 1. sz. pp. 92–100. 2014. Online: <https://doi.org/10.47282/ECONOMICA/2014/7/1/4311>
- [8] Békési B., Major G., „A drónok konfigurációi, alkalmazási területei,” in *Műszaki Tudomány az Észak-kelet Magyarországi Régióban 2022: Konferenciakiadvány*. Nyíregyháza, 2022.06.02. (Nyíregyházi Egyetem Műszaki és Agrártudományi Intézet, Magyar Tudományos Akadémia [MTA] Debreceni Területi Bizottság [DAB] Műszaki Szakbizottsága), Páy G. szerk. Nyíregyháza, Magyarország: Nyíregyházi Egyetem, 2022, pp. 301–307.
- [9] Békési B., Náczi R., „Hagyományos rendszerű és több elektromos energiát igénylő repülőgépek,” in *Műszaki Tudomány az Észak-kelet Magyarországi Régióban 2014*, Pokorádi L. szerk. Debrecen, Magyarország: Debreceni Akadémiai Bizottság Műszaki Szakbizottsága, 2014. pp. 109–119.
- [10] Békési B., Seres J., „Drónok alkalmazásának lehetőségei,” *Repüléstudományi Közlemények*, 3. sz. pp. 5–19. 2020. Online: <https://doi.org/10.32560/rk.2020.3.1>
- [11] C. Zhang et al., „A Comprehensive Review of Electrochemical Hybrid Power Supply Systems and Intelligent Energy Managements for Unmanned Aerial Vehicles in Public Services,” *Energy and AI*, 9. évf. 2022. Online: <https://doi.org/10.1016/j.egyai.2022.100175>
- [12] F. Outay, H. A. Mengash, M. Adnan, „Applications of Unmanned Aerial Vehicle (Uav) in Road Safety, Traffic and Highway Infrastructure Management: Recent Advances and Challenges,” *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 141. évf. pp. 116–129. 2020. Online: <https://doi.org/10.1016/j.tra.2020.09.018>
- [13] H. Danuta, J. Ulam, „Electric Dry Cells and Storage Battery,” United States Patent Office, 3,043,896. 1962. Online: <https://patentimages.storage.googleapis.com/d4/77/09/d50c5d9098da6d/US3043896.pdf>
- [14] H. Zhang, X. Li, H. Zhang, „Li–S and Li–O₂ Batteries with High Specific Energy. Research and Development,” Springer, 2017. Online: https://doi.org/10.1007/978-981-10-0746-0_1
- [15] K. L. Pham et al., „The Study of Electrical Energy Power Supply System for UAVs Based on the Energy Storage Technology,” *Aerospace*, 9. évf. 9. sz. 500. p. 2022. Online: <https://doi.org/10.3390/aerospace9090500>
- [16] M. A. Rendón et al., „Aircraft Hybrid-Electric Propulsion: Development Trends, Challenges and Opportunities,” *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, 32. évf. pp. 1244–1268. 2021. Online: <https://doi.org/10.1007/s40313-021-00740-x>
- [17] Óvári Gy., Békési B., Fehér K., „Az elektromos meghajtású repülés lehetőségei,” in *XVIII. Természet-, Műszaki- és Gazdaságtudományok Alkalmazása Nemzetközi Konferencia – 18th International Conference on Application of Natural-, Technological- and Economic Sciences*. Szombathely, 2019. 05. 18. Pozsgai A., Puskás J. szerk. ELTE Savaria Egyetemi Központ, 2020, pp. 23–33.
- [18] Palik M., „Pilóta nélküli légitáncmű rendszerek légi felderítésre történő alkalmazásának lehetőségei a légierő haderőnem repülőcsapatai katonai műveleteiben,” PhD-értekezés, Budapest, Magyarország: Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem, 2007, pp. 14–19.

- [19] P. Kováč, „Máig felülmúlhatatlan élettartam – EVE Li-SoCl₂ elemek”. Online: www.soselectronic.com/hu/articles/eve-energy/maig-felulmulhatatlan-elettartam-eve-li-socl2-elemek-2204
- [20] R. Bolam, Y. Vagapov, A. Anuchin, „Review of Electrically Powered Propulsion for Aircraft,” in 2018 53rd International Universities Power Engineering Conference (UPEC2018): proceedings, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2018, pp. 1–6. Online: <https://doi.org/10.1109/UPEC.2018.8541945>
- [21] Sion Power's Lithium-Sulfur Batteries Power High Altitude Pseudo-Satellite Flight. Online: <https://sionpower.com/2014/sion-powers-lithium-sulfur-batteries-power-high-altitude-pseudo-satellite-flight/>
- [22] Sziroczak D. et al., „Conceptual Design of Small Aircraft With Hybrid-Electric Propulsion Systems,” *Energy*, 204. évf. 2020. Online: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117937>
- [23] V. Alulema et al., „Propulsion Sizing Correlations for Electrical and Fuel Powered Unmanned Aerial Vehicles,” *Aerospace*, 8. évf. 7. sz. 171. p. 2021. Online: <https://doi.org/10.3390/aerospace8070171>

Propulsion Systems for Unmanned Aerial Vehicles

Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) have been surrounded by a number of issues since their inception. Undoubtedly, the use of these devices has reformed aviation, not only for military but also for civilian use. Every day, a number of areas emerge where their existence can contribute to their efficient operation, and the satisfactory technological development of the 21st century offers the opportunity to challenge these tools in a positive way, increasing their effectiveness. The performance required is strongly linked to the choice of propulsion technology, and research and development in this area is one of the most important directions. This article discusses the possible propulsion systems, their operating principles and their main characteristics. It is important to highlight the requirements of the specific applications, so that it is necessary to select the appropriate design on this basis. Potential challenges for the future should also be taken into account. There is an increasing focus on pure electric propulsion, not only on the ground but also in the air, and hence on the energy supply of systems and its industry. This article aims to provide a comprehensive view and comparison of UAV propulsion systems from several perspectives, with all their advantages and disadvantages.

Keywords: UAV, propulsion, battery, fuel cell

Dr. Békési Bertold
alezredes, egyetemi docens
Nemzeti Közszolgálati Egyetem
Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar
Repülőfedélzeti Rendszerek Tanszék
bekesi.bertold@uni-nke.hu
orcid.org/0000-0002-5709-789X

Bertold Békési, PhD
Lieutenant Colonel, Associate Professor
Ludovika University of Public Service
Faculty of Military Science and Officer Training
Department of Aircraft Onboard Systems
bekesi.bertold@uni-nke.hu
orcid.org/0000-0002-5709-789X

Gajdács László százados, tanársegéd Nemzeti Közszolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Repülőfedélzeti Rendszerek Tanszék gajdacs.laszlo@uni-nke.hu orcid.org/0000-0003-2334-6859	László Gajdács Captain, Assistant Lecturer Ludovika University of Public Service Faculty of Military Science and Officer Training Department of Aircraft Onboard Systems gajdacs.laszlo@uni-nke.hu orcid.org/0000-0003-2334-6859
Knapiczius Attila BsC-hallgató Nemzeti Közszolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Repülőfedélzeti Rendszerek Tanszék attila01.k@gmail.com orcid.org/0009-0001-4317-1120	Attila Knapiczius BsC Student Ludovika University of Public Service Faculty of Military Science and Officer Training Department of Aircraft Onboard Systems attila01.k@gmail.com orcid.org/0009-0001-4317-1120

„A TKP2021-NVA-16 számú projekt az Innovációs és Technológiai Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a TKP2021-NVA pályázati program finanszírozásában valósult meg.”

