

Bicsák György

HIBRID HAJTÁSLÁNC CAL RENDELKEZŐ PILÓTANÉLKÜLI TEHERSZÁLLÍTÓ LÉGIJÁRMŰ KÖVETELMÉNYRENDSZERÉNEK FELÉPÍTÉSE

Jelenleg a repülőipar különböző szegmenseinek egyik leggyorsabban fejlődő ága a pilóta nélküli repülőgépek fejlesztése, alkalmazásának kiterjesztése. Bár kezdetben a hadiipar adta meg a kezdő lökést és jelenti továbbra is az igazi húzóerőt, a pilóta nélküli járműveknek, a polgári célú felhasználásuk – a megfelelő jogi környezet és szabályzás okozta kezdeti hiányosságok ellenére – mára már egyre több területet foglal magába. Ezek egyike, a cargo célú felhasználásuk, specifikus célokra. Az árumozgatás a globalizáció exponenciális növekedésével, az online áruházak mind szélesebb körben történő elterjedésével, a lényegesen rövidebb áruszállítási időtartamok elvárása, fokozatosan túlnő a hagyományos (közúti, vasúti, vízi és hagyományos légi) áruszállítási módok lehetőségein, ezért új technológiák bevezetésére van szüksége. A „Diszruptív technológiák kutatás-fejlesztése az e-mobility területén és integrálásuk a mérnökképzésbe” pályázattal egyetértésben, jelen cikk egy olyan pilóta nélküli, hibrid hajtáslánccal rendelkező teherszállító légi jármű koncepcióját és a szükséges feltétel/követelményrendszerét mutatja be, mely képes az áruszállítás támasztotta körülményeknek megfelelni mind hasznos teher, mind hatótáv szempontjából, ugyanakkor a jelenlegi technológiákhoz képest jóval kisebb környezeti terheléssel és jobb üzemeltetési jellemzőkkel rendelkezik.

Kulcsszavak: hibrid hajtás, pilóta nélküli repülőgép, UAV, cargo repülőgép

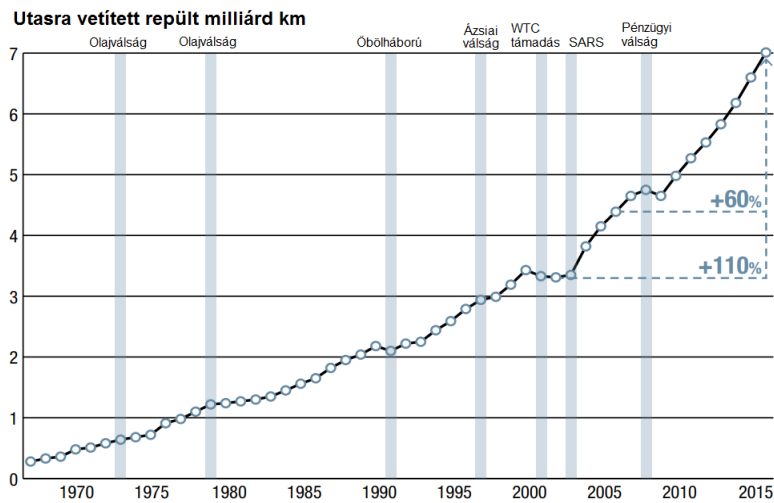
Bevezetés

A globalizáció növekedésével az egyik kulcskérdés egy adott térség fejlettségére vonatkozóan repülőiparának fejlettsége, illetve légiforgalmának nagysága. Ez viszonylag megkérdőjelezhetetlen, hiszen két, egymástól távol lévő földrajzi pont között utazásnak vitathatatlanul a leggyorsabb módja a légiszállítás. A polgári és kereskedelmi repülések mennyisége egyértelmű kapcsolatban van az adott térség GDP-jének változásával, így annak bármilyen irányú módosulása közvetlen hatással lesz a térségben lévő gazdasági szereplők gazdasági mutatóira. Az EU és USA számára mindig is kardinális kérdés volt a légiforgalom stabilitásának biztosítása, ami jelenleg is monoton növekedést mutat e piacokon. Ez, ha nem is kiemelkedő, de mindenképpen akkora, hogy itt a légtérkihasználtság lassan már kezdi felülről korlátossá tenni a kapacitást [1].

A légiforgalom nagyjából 15 évente duplázódik meg, természetesen ezzel együtt fejlesztve a résztvevő országok teljesítőképességét. A jelenleg előre jelzett növekedések miatt a polgári repülésben várhatóan nagyjából ~34 000 új repülőgépre lesz szükség [2], továbbá a meglévő utaszállító flották közel 40%-át kell majd lecserélni. A cargo forgalom esetében várhatóan ~730 új gépre lesz szükség és a meglévő flották 60%-át kell lecserélni [3].

Az elkövetkezendő évtizedek legnagyobb növekedését várhatóan a távol keleti országokban bekövetkező fejlesztések fogják indukálni. A már most is jelentős légiforgalommal rendelkező Kína fejlődése várhatóan 2030-ra a legnagyobb lesz, szorosban nyomában Indiával, illetve az ázsiai és óceániai régióval. Egyébként ezek együttesen már most is a légi utasforgalom közel

felét adják. A teljes piacot tekintve, a légiforgalom ~60%-kal emelkedett az utóbbi 10 évben, ami a 2001. szeptember 11-ei forgalomnak már több, mint duplája. [1]



1. ábra Utasra vetített repült távolságok alakulása 1970-től napjainkig [3]

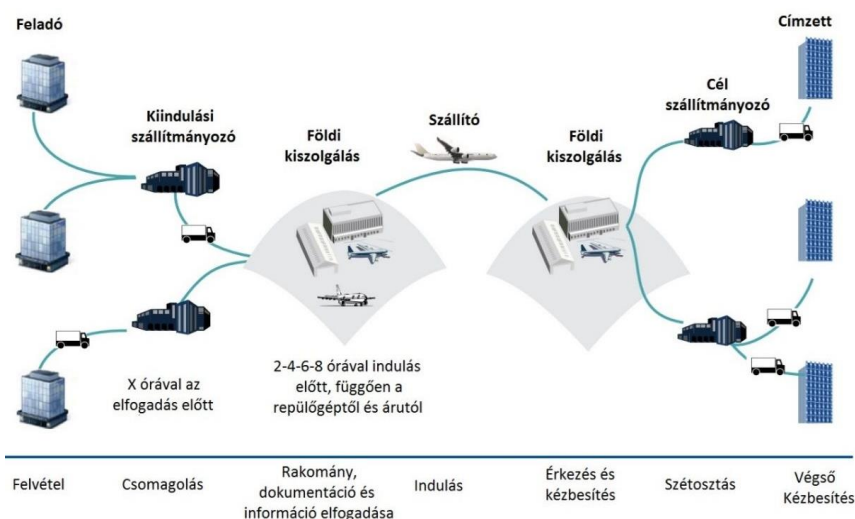
LÉGI SZÁLLÍTMÁNYOZÁS SZEGMENS SAJÁTOSSÁGAI, VÁRHATÓ ALAKULÁSA

A légi szállítmányozás (cargo) más jellemzőkkel bír, mint az utasforgalom alakulása, ebből adódóan – bár igen szoros összefüggés fedezhető fel a két légi forgalmi módozat változása között – nem vonható le egyenesági következtetés egyikből a másik alakulására.

A szállítmányozási láncok, a szállítmányok származási helyétől a rendeltetési helyre történő eljuttatási folyamatok, gyakran összetettek, és számos szabályozási követelménynek vannak kitéve, különösen akkor, ha nemzetközi szállítást és légifuvarozást tartalmaznak. A légi cargo fizikai jellemzőit tekintve diverzív folyamat. Kiindulási helye bárhol lehet a világon, általában az áruk/javak eladójától a vásárlóig, vagy a feladótól a címzettig történő szállítási folyamatot takarja. A szállítás objektuma lehet személyes tárgytól, ajándékoktól, adományoktól kezdve termékmintákon át akár élő állatok vagy veszélyes anyagok, így mindegyikre külön követelményrendszer áll össze. A szállítás alacsony kockázatúnak tekinthető pl. egy ismert forrásból származó rendszeres küldemény esetén egy viszonylag biztonságos régióban, de nagy kockázatúnak, amennyiben az ismeretlen forrásból származó szokatlanabb szállítmány, amely még rendellenességeket is mutat, vagy a különböző országok hírszerzései megfigyelése alatt áll.

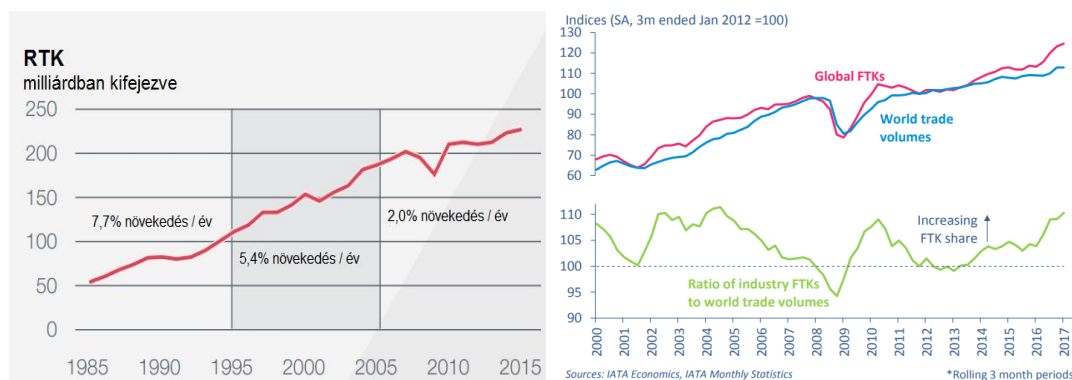
A rakományt a szállítmányozási lánc mentén számos különböző felelősségű szervezet veszi át, beleértve a légi jármű-üzemeltetőket, az expressz fuvarozókat, a postai szolgáltatókat, a szabályozott ügynököket, a feladókat, a címzetteket, a fuvarozókat és a földi kiszolgáltatókat (2. ábra). További komplikációként ezeket az entitásokat gyakran különböző nevek alapján ismerik államonként vagy régióként. A rakományt több különböző légi járat által is szállíthatja, mielőtt eléri a rendeltetési helyét, és a szállítmányokat a jogi és kereskedelmi keretekkel összhangban számos eljárás és dokumentum-feltételnek vetik alá [5].

Mindezek következtében a rakomány mozgatása gyakran (túl)komplikált, és felelősségén az összes résztvevő osztozik, különös tekintettel annak a biztosításáról, hogy a rakomány semmi esetben se veszélyeztesse a repülőgépet, vagy a rajta utazók biztonságát, életét.



2. ábra Légi áruszállítás folyamatának bemutatása [4]

Ahogy azt a 3. ábra is mutatja, légi cargo forgalom a gazdasági világválság óta jóval kisebb lendülettel növekszik, mint azelőtt. A 2009-es válság következményeként egy erős visszaesés következett be a forgalomban, ami csak 2010-ben kezdett el növekvő tendenciát mutatni. A válság ideje alatt a visszaesés elérte a 12,9%-ot is. A 2011 és 2012-es stagnálást követően csak 2013 közepén kezdett el újra emelkedni, 2014-re elérve a 4,8%-os növekedési arányt. Bár 2016 után a növekedés ismét erősödött, a prognosztizált forgalom emelkedés továbbra sem fog viszatérni az egy-két évtizeddel ezelőtti szintekre. Ugyanakkor, tekintetbe véve a meglévő cargo flották nagyságát, a repülőgépek abszolút értékére tekintve a lassabb mértékű növekedés még így is nagyobb számokat eredményez.



3. ábra Bal oldal: A Cargo légiforgalom növekedésének bemutatása 1985-től 2015-ig [4]; Jobb oldal: A Cargo légiforgalom teljesítménymutatója 2007 július és 2017 július között [5]

Ahogy a trendek is mutatják, a cargo légiforgalom alakulása – bár rendelkezik közös pontokkal a személyszállító légitársaságokkal – jelentős eltéréseket mutat sajátos felépítéséből, működési rendjéből, és a rá vonatkozó különböző előírásokból adódóan. A legfontosabb driver-ei sem egyeznek feltétlenül a személyi légitársaságokkal, így például számottevő hatással lehet az új termék bevezetése, vásárlási szokások megváltozása, online vásárlási lehetőségek elterjedése, regionális infrastruktúra, piaci szegmensek változásai stb.

Az igények kielégítésére napjainkban jellemzően 3 különböző konstrukciós kialakítású repülőgépet alkalmaznak: a széles- és keskenytörzsűeket, valamint a jellemzően turbópropellereseket (kiszolgáló/terítő feladattal). Természetesen akadnak speciális igényeket kielégítő típusok is, mint az Airbus Beluga vagy az Antonov An-124/225. Jelenleg szolgáló flotta jelentős részét eredetileg személyszállító légijárműnek tervezték, és kisebb-nagyobb módosítások árán konvertálták azokat cargo-vá. Utóbbiak jellemzően öregebbek, tüzelőanyag fogyasztásuk magasabb, így esetenként karbantartásuk, üzemeltetésük is drágább, mint amennyi hasznot hoznak. A szélestörzsű repülőgépekkel szállítható hasznos teher tömege 35–110 t. A jelenleg használt legjellemzőbb típusokat a 4. ábra mutatja.



4. ábra Napjainkban használt cargo repülőgép típusok [7]

Ahogy az mind a 2., mind 4. ábrákon látható, a légiszállítmányozás jelenleg elsősorban a transzatlanti, vagy nagy távolságú desztinációkra használatos. Mind a járműpark, mind pedig a kialakult modellek főleg a távolsági (>300 km) útvonalak megtételét célszerűsítik légi úton, viszont a szétosztás, kézbesítés már jellemzően közúti szállítmányozással történik. Ez utóbbi még érthető is, hiszen a végső házhozszállítást légi úton megoldani több nehézségbe is ütközik – ahogy ezt a következő fejezetben be is mutatom. A 300 km alatti szétosztás (repülőterek és logisztikai központok között) pedig jellemzően az alkalmas járműállomány hiányában használja a konvencionális módszereket [8]. Cikkem célja e szegmens újragondolása, olyan pilótanélküli járművek alkalmazásával, melyek hatótávolsága maximum 300 km, kisebb hasznos teher, pl. egy-egy konténernyi áru elszállítását teszik lehetővé.

PILÓTANÉLKÜLI REPÜLŐGÉPEK ÉS A LÉGI-SZÁLLÍTMÁNYOZÁS KAPCSOLATA

A napjainkig alkalmazott cargo UAV¹-k általában kisméretűek, 5–15 kg össztömegűek. Jelentős részük ráadásul csak prototípus, sorozatgyártásuk nem indult el, egyrészt a felvevő piacnál egyelőre nem feltétlen van meg a szükséges kereslet rájuk, másfelől (talán még nyomosabban) a meglévő törvények továbbra is ingoványos talajként kezelik a pilóta nélküli repülőgépek használatát. Bár koncepciószinten minden gyártó a lehető legegyszerűbb üzemeltetési körülmények megteremtésére törekszik, a tapasztalatok azt mutatják, hogy folytonosan szükség van az ő szakértelmükre, az általános üzemeltetés, karbantartás, és főleg a hibakeresés során, mivel az üzemeltető részéről hiányzik az ehhez szükséges technológiai háttér. Így az UAV-k használata előtt részletes elméleti és gyakorlati képzés szükséges az alkalmazó, működtető személyzet számára, melyben a technikai és biztonsági információk kerülnek átadására. A polgári felhasználásban alapvetően három konstrukció terjedt el a cargo UAV-k körében: a merevszárnyas, a multi-rotor és a hibrid repülőgép, melyeket az 7. ábra szemléltet.



5. ábra Merevszárnyas (balra); multi-rotor (középen) és hibrid (jobbra) cargo UAV repülőgépek [6]

Jellemzően 3 konstrukció közül azt választja ki a leendő üzemeltető, amelyik az optimális (vagy legalább a leginkább megfelelő) paraméterekkel bír a célfeladata ellátásához. Az UAV üzemeltetőjének mérlegelnie kell:

- a környezeti, földrajzi jellemzőket;
- a repülőterek, fel- és leszállópályák/helyek sajátosságait;
- a szabályozási körülményeket;
- a cég sajátosságait, speciális igényeit;
- a kapcsolódó direkt és indirekt üzemeltetési költségeket;
- a rendelkezésre álló infrastruktúrát;
- egyéb, az üzemeltetést befolyásoló tényezőket.

Függetlenül a konstrukció kialakításuktól, az UAV-k egyik legfontosabb feladata, hogy pilóta nélkül képesek legyenek előre meghatározott repülési útvonalakat végigrepülni elsősorban GPS alapú navigációval. Az út során felmerülő akadályok – vagy éppen a többi repülő objektum – kikerülésére beépített szenzorok segítségével ütközésgátló és kommunikációs rendszerekkel kell felszerelni azokat. Ugyanakkor egyes típusoknál lehetővé kell tenni, hogy egy pilóta, operátor, távoli eléréssel felül tudja bírálni, módosítani tudja az előre meghatározott repülési útvonalat. Ezen alapfeladatokat az

¹ UAV (Unmanned Aerial Vehicle) pilóta (vagy személyzet-) nélküli légi jármű

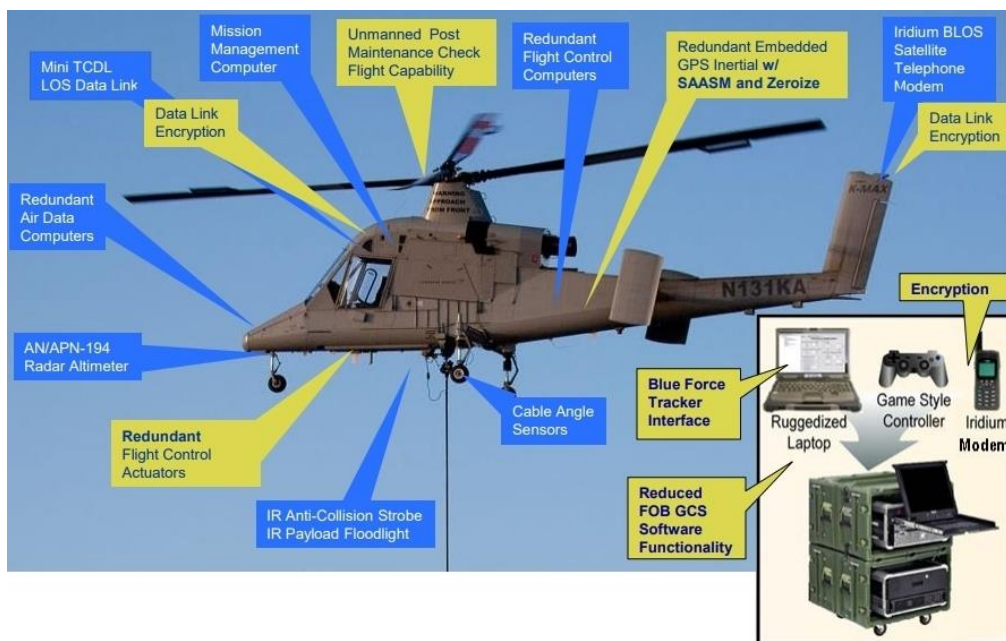
egyres típusok a konstrukciók sajátosságaiból adódóan különböző hatásokkal képesek ellátni. A három változat fontosabb jellemzői az 1. táblázat segítségével vethetőek össze.

	Merevszárnyas	Multi-rotor	Hibrid
Hatótáv	60 km	20 km	80 km
Hasznos teher	5 kg	2 kg	5 kg
Indítás módja	Katapult	Függőleges felszállás	Függőleges felszállás
Előnyök	<ul style="list-style-type: none"> Hosszabb hatótáv Jobb hatásfok Több hasznos teher, mint multi-rotor esetén Stabilabb repülés Megalapozott koncepciók a hagyományos repülőgépekből következően 	<ul style="list-style-type: none"> Manőverezés kis területen Függőleges fel- és leszállás Olcsóság 2 propellerrel már repképes 	<ul style="list-style-type: none"> Függőleges fel- és leszállás, mégis hasonló hatótáv, mint a merevszárnyas konstrukciónál Több lehetőség a fel- és leszállás során Nagyobb teherbírás, mint a multi-rotor esetén Könnyebb vészhelyzeti leszállás
Hátrányok	<ul style="list-style-type: none"> Nagy helyigény fel- és leszálláshoz Limitált manőverező-képesség kis területen Vészhelyzeti landolást nehezebb kivitelezni 	<ul style="list-style-type: none"> Alacsony hasznos teherbíró képesség Általában komplexebb tervezés (szoftver miatt), bonyolultabb karbantartási feladatok Limitált hatótáv Bizonyos feladatokra alkalmatlan 	<ul style="list-style-type: none"> Drágább Alacsonyabb manőverező-képesség, mint multi-rotor esetében Rövidebb hatótáv, mint merevszárnyú esetében
Gyártók	Zipline Wings for Aid UAVaid	Matternet Flirtey Microdrones	Amazon Google DHL Drones for Development – Dr. One. Quantum Systems Vayu
Felhasználók	Ruanda kormánya MOAS	MSF Világbank UNICEF Svájci posta	MSF (tervezett) We Robotics (tervezett)

1. táblázat Különböző UAV konstrukciók előnyei és hátrányainak összefoglalása [9]

Az általam prognosztizált konstrukcióhoz viszont szinte minden dimenziójában a bemutatott verzióknál nagyobb teljesítmény szükséges. E terület ugyanakkor a polgári repülésben még nem igazán elterjedt, a katonai alkalmazások pedig még többségében titkosítottak.

A kívánt hatótáv és hasznos teher eléréséhez elsősorban a helikopterek, illetve konvertiplánok a legalkalmasabbak. Az egyik elérhető koncepció e területen a Kaman Aerospace és Lockheed Martin közös prototípusa, a K-MAX (6. ábra). E légi jármű tervezett repülési sebessége csak 150–185 km/h, viszont hatótávolsága akár 500 km-t is eléri. A saját tartályában lévő üzemanyaggal 2,5 óra a repülési ideje, míg póttartállyal ez akár 12 órára is növelhető. Teherbírása ~2700 kg, míg össztömege 5450 kg. Repülési magassága eléri a 15 000 lábat, vagyis 4572 m-t [10].



6. ábra A Kaman Aerospace és Lockheed Martin K-MAX koncepciója közepes hatótávú, nagy teherbírású, pilóta nélküli UAV-re [10]

A konvertiplánok közül a Boeing V-22-ese sokkal nagyobb teljesítményű, mint az általunk meghatározott, az AgustaWestland AW609-es rendelkezik hasonló paraméterekkel, viszont ez a repülőgép teljesen eltérő feladatra készült. A jóval korábbi Bell XV-15, AgustaWestland Project Zero, IAI Panther mind kisebb teherbírásúak, mint ami az elérendő cél lenne [11].

A HIBRID HAJTÁS ALAPJAI

A hibridizáció mértéke alapján az alábbi 3 csoport különböztethető meg egymástól:

1. Teljesen hibrid elektromos járművek

Azok a hibrid-elektromos járműveket sorolhatóak ebbe a kategóriába, melyek függetlenül és kombinálva is képesek elektromos és belső égésre támaszkodó hajtásrendszereiket használni és mindkettővel jelentős teljesítményeket leadni vagy távokat megtenni [12].

2. Támogatottan hibrid elektromos járművek

Azon hagyományos járműveket sorolják ebbe a kategóriába, melyek fő teljesítmény forrása egy belsőégésű motor, ezen túl rendelkeznek egy másodlagos, közepes teljesítményű, de önálló meghajtásra alkalmatlan elektromos motorral. Ezeknél az elektromotor szerepe a motor átforogatásán és az indítás könnyítésén túl a gyorsítás támogatása [12].

3. Enyhén hibrid elektromos járművek

Még inkább a hagyományos járművekhez hasonlítanak, lényegében egy túlméretezett indító-motorral rendelkeznek. Az elektromotort a belsőégésű motor dugattyúinak mozgásában tartására használják, akkor, amikor teljesítmény leadására nincs szükség. Ezzel üzemanyag takarítható meg, illetve gyorsabb és tisztább motorindítások érhetők el [12].

Az elektromos energia mechanikai munkává történő átalakítása szempontjából pedig az alábbi két módzat különböztethető meg:

1. Koncentrált, azaz központi vég-energiaátalakítás

A hajtásrendszer által termelt mechanikai energia, úgy hasznosul, mint egy hagyományos, pusztán belsőégésű motorra támaszkodó járműben. Légcsavaros repülőgép esetén, a motorból érkező mechanikai energia áttételen keresztül, de további rásegítés nélkül, hajtja meg a légcsavart vagy légcsavarokat. Közúti járművek esetén pedig a belsőégésű motor egy differenciálmű segítségével adja át a meghajtást a kerekekre. Tehát az elektromotor és a belsőégésű motor teljesítményének összegzése a végfelhasználáshoz képest korábban, egy központi áttételházban történik meg [13].

Ilyen, központi energiaátalakítást végző hajtáslánccot, elsősorban akkor érdemes kialakítani, ha a meghajtandó fogyasztók száma alacsony, vagy ha a hibridhajtás párhuzamos jellegű és nem magasan hibridizált [12].

2. Elosztott vég-energiaátalakítás

Azokat a hajtásokat nevezik elosztottnak, ahol minden egyes mechanikai energiát fogyasztó berendezésre jut egy-egy, azokat külön tápláló motor. Ez hibrid-elektromos hajtások esetén, úgy valósítható meg, ha minden fogyasztóhoz tartozik egy elektromotor, párhuzamos hibridhajtás esetén külön áttétel is, ahol a teljesítményeket összegezni lehet [14].

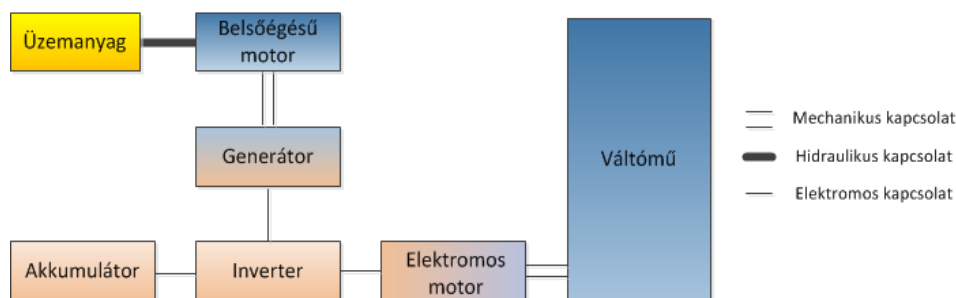
Elosztott energiaátalakítást végző hajtáslánccot, elsősorban akkor érdemes kialakítani, ha sok fogyasztót kell táplálni és a meghajtást tisztán-elektromos vagy soros hibridelektromos hajtásrendszerrel biztosítjuk [12].

A hibrid-elektromos járművek hajtásrendszerei a felhasznált erőforrásokat különböző módon kapcsolhatják össze, így beszélhetünk soros vagy párhuzamos elrendezésről. Ezek legfőbb jellemzői a következőképpen alakulnak:

Soros elrendezés

A soros hibrid hajtáslánc tartalmaz egy üzemanyagtartályt és egy akkumulátort, mint energia tárolót, egy belsőégésű motort, mint a nyugvó energia mechanikussá alakítóját, egy generátort, ami a mechanikus energiát elektromossá konvertálja, valamint legalább egy elektromotort, amely a jármű hajtásáért felelős. Az előbbi elemeken kívül a motor típusától függően – mint egyenáramú vagy váltóáramú – szükség lehet egy inverterre, valamint egy egyenirányítóra az akkumulátor és a generátor közé.

E rendszerekben nincs mechanikus kapcsolat a belsőégésű motor és az elektromosan táplált eszközök, berendezések, motorok között [15].



7. ábra Soros hibrid-elektromos hajtáslánc [16]

A soros hibrid elektromos hajtás üzemmódjai:

- **tiszta villamos hajtás:** azaz akkumulátoros üzemmód, amikor a belsőégésű motor nem üzemel, nem fogyaszt tüzelőanyagot, de nem is termel energiát;
- **tiszta motorikus mód:** a meghajtást kizárólagosan a belsőégésű motor biztosítja, a generátor táplálásán keresztül;
- **hibrid mód:** a meghajtás, mindkét energiaforrás használatával biztosított;
- **motorikus és akkumulátortöltő mód:** a tüzelőanyag energiája biztosítja a meghajtást és az akkumulátorok töltését is. álló jármű esetén tiszta akkumulátor töltő üzemmód. haladó jármű esetén kiegészülhet a "visszatápláló" üzemmóddal;
- **„visszatápláló” fékezési mód:** felszíni járművek esetében lehetséges üzemmód, megfelelő elektromos rendszer esetén az elektromotorokat generátorként alkalmazva, a fékezések energiáját az akkumulátorok töltésére lehet fordítani.

A soros hibrid hajtás előnyei:

- a belsőégésű motor a jármű hajtásigényétől függetlenül működik. Így elérhető, hogy kizárólag a legmagasabb hatásfok közelében üzemeljen;
- felhasználástól függően kialakítható koncentrált és elosztott meghajtás is;
- kevesebb a mozgó alkatrész.

A soros hibrid hajtás hátrányai:

- a tüzelőanyag energiataralmát felhasználás előtt legalább háromszor kell átalakítani, de akkumulátorok töltésére is alkalmazva, még további két konverzió szükséges;
- a vonóerőt létrehozó motor(oka)t, úgy kell méretezni, hogy a maximális követelményeket is képesek legyenek teljesíteni.

Párhuzamos és komplex-párhuzamos elrendezés

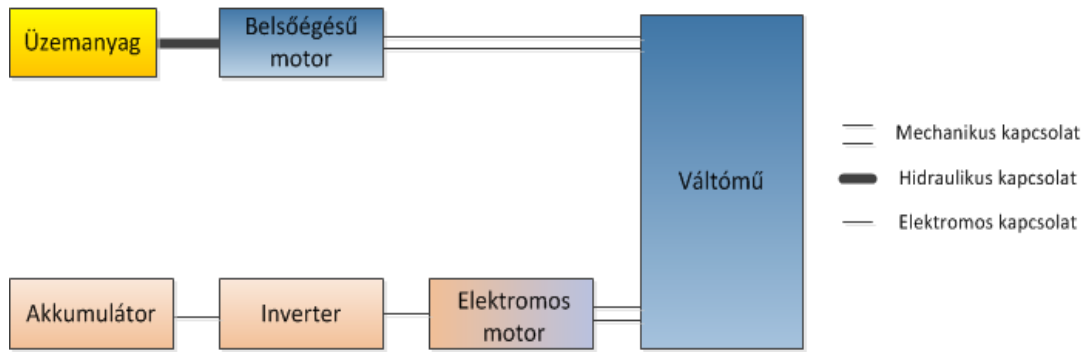
Párhuzamos elrendezések esetén az elsődleges és másodlagos energiahordozókat külön-külön alakítják mechanikai energiává és üzemmódtól függően együtt vagy külön használják azokat.

Egy párhuzamos hibrid hajtáslánc felépítése tartalmaz egy üzemanyagtartályt és egy akkumulátort, mint energia tárolót, egy belsőégésű motort, mint a nyugvó energia mechanikussá alakítóját, legalább egy elektromotort, valamint az elektromotorok számával egyező mennyiségű mechanikus teljesítményösszegző áttételt. Az előbbi elemeken kívül a motor típusától függően – mint egyenáramú vagy váltóáramú – szükség lehet egy inverterre az akkumulátor és az elektromotor közé. A párhuzamos hibrid rendszerek felépítése függ: a hibridizáció mértékétől, azaz a beépített akkumulátor kapacitásától, elektromotor teljesítményétől, és a teljesítményt összegző áttétel jellegétől [14].

Tisztán párhuzamos hibridhajtás

Tisztán párhuzamosnak nevezzük azokat a kapcsolásokat, ahol a belsőégésű motor nem használható villamos energia előállítására, azaz a két hajtásrendszer – a tüzelőanyag alapú és az elektromos – csak a véghajtómű előtt a teljesítmény összegzőben kerül kapcsolatba.

Az ilyen elrendezések a soros- hibridhajtásnál tárgyalt üzemmódok közül a motorikus akkumulátor töltésre nem képesek, az összes többire viszont igen, eltekintve a berendezések kapcsolásainak különbségeitől.



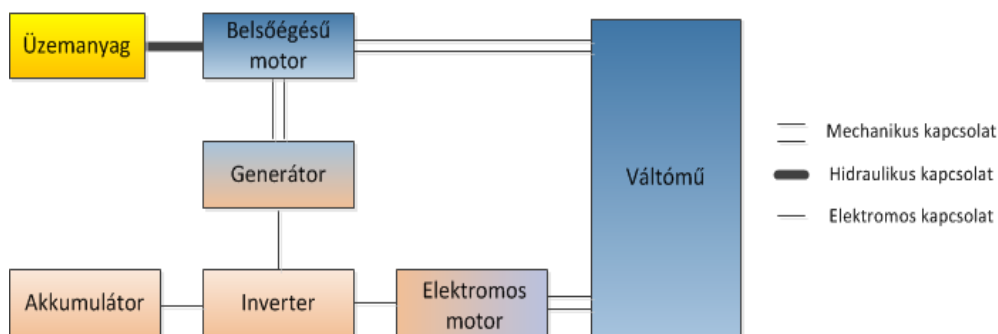
8. ábra Tisztán párhuzamos hibrid-elektromos hajtáslánc [16]

Tisztán párhuzamos hajtás előnyei:

- a soroshoz hasonlóan, ahol a belsőégésű motor optimális fordulatszám tartományban üzemeltethető, itt ugyanez az elektromotorról is elmondható;
- az erőforrások energiáit a rendszer csak egyszer alakítja át, így kisebb az ebből adódó veszteség;
- kisebb a hajtásrendszer tömege, mivel pl. nem tartalmaz generátort;
- tisztán párhuzamos hajtás hátránya, hogy a fékenergia visszatáplálásán kívül, nincs az akkumulátorok töltésére alkalmas üzemmódja.

Komplex-párhuzamos hibridhajtás

Ezekben a hajtásrendszerekben megvalósítható a soros hajtásrendszernél bemutatott összes üzemmód [15].



9. ábra Komplex-párhuzamos hibrid-elektromos hajtáslánc [16]

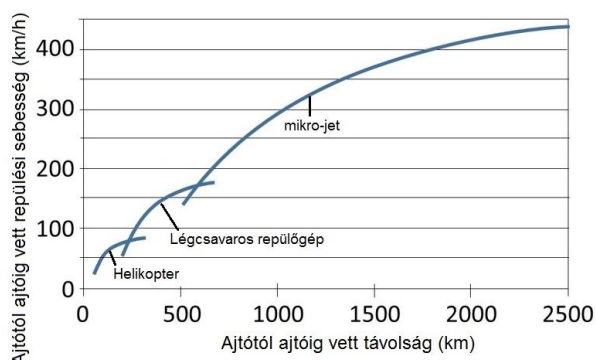
Komplex párhuzamos hajtás előnyei:

- a tisztán párhuzamos hajtáshoz hasonlóan, a belsőégésű motor és az elektromotor is optimális fordulatszám tartományban üzemeltethető;
- van lehetőség az erőforrások energiáit, egyszeri átalakítással felhasználni;
- van lehetőség az akkumulátorok töltésére

Komplex párhuzamos hajtás hátránya, hogy ez a hajtásrendszer-típus rendelkezik a legtöbb mechanikai és elektromos kapcsolattal, valamint berendezéssel, így szerkezeti tömege is ennek a legnagyobb.

Attól függően, hogy mekkora egy repülőgép hatótávolsága és repülési sebessége, eltérő propulziós rendszereket alkalmaznak. Míg nagy felszállótömeg, nagy repülési távolságok esetén a gázturbinák hatékonysága kedvezőbb, addig csökkenő hatótáv és tömeg esetén a turbópropelleres majd a propelleres toló-/vonóerő termelés az előnyösebb. A vizsgált rendszerek propulziós

hajtását tekintve a 10. ábra alapján a légcsváros megoldás tekinthető legkedvezőbbnek az áttekintett megoldások közül.



10. ábra Ajtótól-ajtóig alkalmazott repülőgép fajták összevetése repülési sebesség és távolság alapján [saját]

CARGO UAV KÖVETELMÉNYEINEK MEGHATÁROZÁSA, SPECIFIKÁCIÓK

Ahhoz, hogy a megcélzott piaci rés követelményeit ki lehessen elégíteni, a pilótanélküli cargo repülőgépnek több speciális elvárást is teljesítenie kell. E fejezet célja, az utóbbiak összegyűjtése, majd ezeket számszerűsíteni és rendszerbe foglalni. A beszállítói és elosztói elvárásoknak való megfelelés érdekében, illetve, hogy a tervezett légijármű egyértelműen piaci előnyt jelentsen a közúti áruszállítással szemben, a következőknek kell megfelelnie:

- a pilóta nélküli konstrukció, melyet nagyobb és kisebb cégek is üzemeltethetnek;
- hibrid hajtás;
- az UAV-nek felszállásra késznek kell lennie maximum 30 percen belül, beleértve a be- vagy kirakodást is. Utóbbit a tankolással, felszállásra való felkészítéssel egyszerre is el lehessen végezni;
- az indításhoz szükséges biztonsági intézkedések rövid időn belül (maximum 15 perc) legyenek végrehajthatóak;
- az UAV kisebb repülőtereken és logisztikai központokban (vagyis nem ellenőrzött területeken) is legyen képes fel- és leszállásra;
- fel- és leszállás során tisztán elektromos hajtással üzemeljen a kisebb környezeti terhelés miatt;
- leszállás közben lehetőleg termeljen vissza energiát az akkumulátor(ok)ba;
- repülési sebessége a 250–280 km/h-t, hatótávolsága a ~400 km-t, repülési magassága a 70–90 FL (2–3000 m) érje el;
- rendelkezzen automatikus navigációs és irányító rendszerekkel, automatikus repülés-végrehajtás, szükség esetén a távirányítás lehetőségével, valamint helyből le-és felszállás képességével, kibertámadások elleni védelemmel;
- legyen vészleszállító rendszere a repülésirányító rendszer meghibásodása esetén;
- tartson folyamatos kommunikációs kapcsolat az üzemeltetői központtal;

Indikátor neve	Definíció	Befolyásoló tényezők	Korlátozások	Megjegyzés
költség	a teljes élettartam-költség repült órára vetítve	- tulajdonjog (megosztás) - a repülőgép teljesítménye - az üzemanyagárak - nyújtott szolgáltatás - a környezeti hatásoktól függő repülőtéri vagy légtérhasználati illeték - adózási rendszer (előnyben részesítve az elektromos áram használatát)	a repülőgépek üzemeltetési költségeinek a kamionok üzemeltetési költsége alattinak kell lennie	A NASA SATS projekt tagjai által kifejlesztett repülőgép már elérte ezt a küszöbértéket kisrepülőgép kategóriában
ajtótól aajtóig vett idő (τ_{DD}) vagy sebesség (V_{DD})	az „ajtótól aajtóig” vett teljes utazási idő vagy sebesség	- nyújtott szolgáltatás - a repülőgép teljesítménye - a repülőterek távolsága a logisztikai központoktól - közúti/vasúti infrastruktúra	$V_{DD} = (2,1 + 0,00004R)^{0,67}$ $\tau_{DD} = R/V_{DD}$ R – „ajtótól aajtóig” vett távolság $[V_{DD}] \rightarrow \frac{km}{h}; [\tau_{DD}] \rightarrow h; [R] \rightarrow km$	példa a küszöbértékre
biztonság és védelem	baleset kockázata halálos baleset kockázata bűncselekmény kockázata eltérítés kockázata	- repülőgép teljesítmény - légijármű-ellenőrző rendszer - légiforgalmi irányítás - pilótafülke műszerek - kísérleti támogató rendszer - pilóta, légijármű- és légiforgalmi irányítás, vészhelyzetkezelés - légi, repülőtéri és légiforgalmi biztonsági rendszer - biztonsági joghatóság	baleset kockázata $\leq 10^{-5}$ halálos baleset kockázata $\leq 10^{-7}$ bűncselekmény kockázata $\leq 10^{-6}$ sikeres eltérítés kockázata $\leq 10^{-10}$	a meghatározott küszöb-értékek elég alacsonyak, de mindezek további megbeszélések tárgyát képezik
igények	az adott repülőgép igény szerinti rendelkezésre állási ideje	- repülőgépek száma, - légi taxi szolgáltatások - a tulajdonjogok megosztása, - informatikai rendszer	$\tau_{DD} = 15 + 0,02 * R \text{ perc}$ R – „ajtótól aajtóig” vett távolság	

2. táblázat Alkalmazott indikátorok és azok előzetes definiálása [saját]

- ➔ feleljen meg a logisztikai cégek által támasztott speciális követelmények (pl. nemzetközi egységes konténerméretek és szállítandó tömegek), valamint megrendelői/üzemeltetői specifikus elvárások (nyomon követés, kommunikáció, a meglévő minőségbiztosítási rendszer integrálása stb.);
- ➔ egyszerű, fail-safe mechanizmusok az üzemeltetési és karbantartási követelmények csökkentése, illetve a mobilitás növelése érdekében;
- ➔ automatikus rakomány feltöltés és ürítés;
- ➔ építéséhez környezetbarát anyagokat használata;
- ➔ multifunkcionalitás: fel- és leszálláskor használt elemek többcélú használata a súlycsökkentés érdekében.

Konténer méretek

A felhasználási területeiket tekintve e konténerek elsősorban a tengeri áruszállításra lettek kialakítva, tömegük meghaladhatja a 20 tonnát is. Bár érdekes feladat lenne a kikötői ki- és berakodás folyamatának felgyorsítására bevezetett cargo UAV-eket tervezni, ezek össztömege így könnyen meghaladhatná a 40–50 tonnát, ami mindenképpen a hagyományos, jet hajtást igényelne. A hibrid hajtások energiasűrűsége még nincs ezen a szinten.

Az áruk szállításának alapjait a konténerek jelentik, melyeket a szállítmányozás egyszerűsítésére vezettek be, és szabványosítottak világszerte. E szabványt az ISO-container tartalmazza a következő méretekkel:

Típus	Hossz [mm]	Szélesség [mm]	Magasság [mm]	Súly (üres) [kg]
6 lábás	1900	1750	1800	500
8 lábás	2438	2000	2221	700
10 lábás	2991	2438	2591	1000
15 lábás	4550	2200	2260	1300
20 lábás	6058	2438	2591	2200
40 lábás	12 192	2438	2591	3700
40 lábás HC	12 192	2438	2900	3900
45 lábás HC	13 500	2438	2900	4200

3. táblázat A standard ISO konténerek méretei [17]

Így a szállítandó konténereknek elsősorban a repülésben már használt „Unit Load Device”-okat (ULD) vesszük alapul. Ezek alapvető formái a konténerek, illetve a raklapok, melyek méreteit a 4 táblázat mutatja be.

Az LD1–LD3-ig a konténerek maximális tömege 1588 kg, a nagyobb LD11 pedig maximum 3176 kg lehet (hasznos teherrel együtt). [19] Természetesen létezik több variációs is, főleg a raklapok esetében (itt a maximum tömeg akár 11340 kg is lehet), viszont 3176 kg lehet az a felső határ, amit az előzetes tervezés során alapul vehető. Így a szállítmányozási folyamatban a széles/keskenytörzsű cargo gép beérkezése után a célrepülőtérre az ULD-k kivétele után azok felesleges ki- vagy becsomagolása helyett módosítatlan formájukban elindulhatnak a logisztikai központokba.

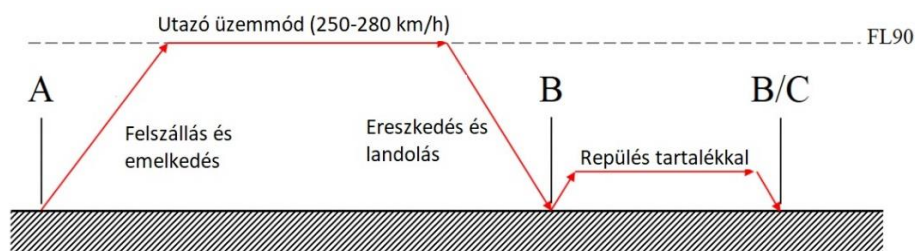
Előírások, üzemeltetési profil

Bár az elektromos hajtású kisrepülőgépek egy töretlenül fejlődő szegmense a repülőiparnak, jelenleg nincs konkrét reájuk vonatkozó előírás. Az EU-OPS 1.255 a repülőgépekre vonatkozó mérvadó szabályozása szerint, a hajtómű/motor leállítása után a fedélzeten nem lehet kevesebb tüzelőanyag, mint ami dugattyús motor esetében 45 perc, gázturbina esetében pedig 30 perc üzemeléshez szükséges. A jelenleg ismert, tervezett (Siemens Extra 330LE, Siemens Magnus eFusion, Pipistrel Alpha Electro) elektromos repülőgépek egyike sem teljesíti e feltételeket, igaz ezek a gépek nem is pilóta nélküli repülőeszközök, és nem is hasonló mérettartományban mozognak, mint a tervezett cargo UAV.

Ahhoz, hogy később meghatározható legyen a repülőgép szükséges tömege, fel kell állítani egy, teljes ciklusra vonatkozó repülési profilt. (11. ábra) Ez a felszállást követően a repülési magasság elérése után egy konstans magasságon történő, utazó üzemmódú repülést, illetve ezt követően a süllyedést és leszállást jelenti. Továbbá – kompatibilissé téve a jelenlegi előírásokhoz – egy tartalékkal való rövidebb repülési szakasz végrehajthatóságát.

Konténer típus	Térfogat [m ³]	Méreték (bázisszélesség / teljes szélesség × mélység × magasság) [mm]	Megjegyzés
LD1	4,9	1560 / 2340 × 1530 × 1630	kontúros, félszélességű
LD2	3,4	1190 / 1560 × 1530 × 1630	kontúros, félszélességű
LD2	4,5	1560 / 2010 × 1530 × 1630	kontúros, félszélességű, IATA szerinti méretek
LD3-45	3,6	1560 / 2440 × 1530 × 1143	dupla kontúros, teljes szélességű, IATA szerinti méretek, A320-as kompatibilitás
LD6	8,95	3180 / 4070 × 1530 × 1630	kontúros, teljes szélességű, 2 LD3-asnak felel meg
LD8	6,88	2440 / 3180 × 1530 × 1630	kontúros, teljes szélességű, 2 LD3-asnak felel meg, DQF toldalék
LD11	7,16	3180 × 1530 × 1630	Kontúr nélküli LD6-os, négyszögletes
LD8	6,88	1530 × 2440	azonos méretű konténer-változatok;
LD11	7,16	1530 × 3180	azonos méretű konténer-változatok; PLA, FLA toldalékok
LD7 (2 variáció)	10,8 11,52	2240 × 3180 2440 × 3180	PAG, P1P toldalékok PMC, P6P toldalékok
Konténer típus	Térfogat [m ³]	Méreték (bázisszélesség / teljes szélesség × mélység × magasság) [mm]	Megjegyzés
LD1	4,9	1560 / 2340 × 1530 × 1630	kontúros, félszélességű
LD2	3,4	1190 / 1560 × 1530 × 1630	kontúros, félszélességű
LD2	4,5	1560 / 2010 × 1530 × 1630	kontúros, félszélességű, IATA szerinti méretek
LD3-45	3,6	1560 / 2440 × 1530 × 1143	dupla kontúros, teljes szélességű, IATA szerinti méretek, A320-as kompatibilitás
LD6	8,95	3180 / 4070 × 1530 × 1630	kontúros, teljes szélességű, 2 LD3-asnak felel meg
LD8	6,88	2440 / 3180 × 1530 × 1630	kontúros, teljes szélességű, 2 LD3-asnak felel meg, DQF toldalék
LD11	7,16	3180 × 1530 × 1630	Kontúr nélküli LD6-os, négyszögletes
Raklap típus	Térfogat [m ³]	Méreték (bázisszélesség / teljes szélesség × mélység) [mm]	Megjegyzés
LD8	6,88	1530 × 2440	azonos méretű konténer-változatok;
LD11	7,16	1530 × 3180	azonos méretű konténer-változatok; PLA, FLA toldalékok
LD7 (2 variáció)	10,8 11,52	2240 × 3180 2440 × 3180	PAG, P1P toldalékok PMC, P6P toldalékok

4. táblázat ULD típusok [18]



11. ábra A koncepcionális cargo UAV üzemelési profilja [saját]

A felszállás függőlegesen történik, csak az elektromos energiát felhasználva, majd az emelkedés folyamán már alkalmazható a beépített konvencionális motor/gázturbina egység is. A repülési magasság 9000 láb (=2743 m = FL90) történik, ahol 250–280 km/h sebességgel halad a cargo UAV. Az előző fejezetben leírtaknak megfelelően, a hatótávolság legalább 400 km, így az ábra A és B pontja közötti táv is ennek felel meg. Szintén limitként jelenik meg a repülési magasság elérése, melyet 20 percen belül meg kell érni. Figyelembe véve a repülési magasságot ez átlagosan 2,29 m/s-os emelkedési sebességet jelent (\mathbf{w}_{cl}), amivel némileg mérsékelhető a hajtásrendszer teljesítményigénye. Tekintve a repülőgép várható össztömegét, a belső égésű motorok valószínűsíthetően nem lesznek képesek elegendő energiát termelni, így az elektromos hajtás mellé gázturbina egységet kell telepíteni, aminek a tartalékkal történő repüléskor 30 perc időtartamot kell kibírnia.

Az A és B közötti távolság a leírt folyamatok alapján a következő egyenlettel írható le:

$$d_{AB} = V_{cl} \cdot t_{cl} \cdot (1 - \tau_{cl}) + d_{cr} + V_{des} \cdot t_{des} \cdot (1 - \tau_{des}) \quad (1)$$

ahol d_{cr} jelöli az utazó üzemmódban megtett távolság, V_{cl} és V_{des} az emelkedés és süllyedés átlagos földhöz viszonyított sebessége, t_{cl} és t_{des} az utazó és süllyedési fázisok időtartama, τ_{cl} és τ_{des} a fel- és leszállópályák közelében történő manőverek időtartama.

Ahhoz, hogy meghatározható legyen az egyes repülési fázisok végrehajtásához szükséges teljesítményt, a következő repülésmechanikai egyenletet kell használni:

$$P_{eng_i} = \left(\frac{w_i}{w_i} + D_i \cdot V_i \right) \cdot \frac{1}{\eta_{prop_i} \cdot \eta_{trans_i} \cdot \zeta_i} \quad (2)$$

ahol w_i jelöli a vertikális sebességet, melynek értéke emelkedés során pozitív, utazó üzemmódban 0 és süllyedéskor negatív; W_i a repülőgép tömege, D_i a légellenállás adott állásszögön; η_{prop_i} a légszárny hatásfoka; η_{trans_i} az áttételi rendszer hatásfoka; ζ_i teljesítmény beállítások a maximális folyamatos energiagazdálkodási értékhez képest. A kezdeti számítások során az egyes paramétereket még csak becsülni lehet. Tovább nehezíti a számítási folyamatot, hogy nincs hasonló koncepciójú repülőgép a piacon, így a hiányzó paraméterek (pl. a légellenállás) kiszámítása csak közelítő algoritmusok, módszerek segítségével történhet.

Amíg egy elektromos motor tengelyteljesítménye független a repülési magasságtól, addig ez nem mondható el a gázturbinákról. Ennek a figyelembe vételével vezethetjük be például az Austyn-Mair és Birdsall modellt:

$$\frac{P}{P_{SL}} = A M^n \quad (3)$$

ahol, P jelöli a leadott (magasságfüggő) teljesítményt, P_{SL} a tengerszinten leadott (etalon) teljesítményt, A hajtóműre jellemző konstans, M a Mach-szám és n pedig szintén egy hajtómű függő konstans.

A szükséges akkumulátor kapacitás meghatározható, ha összegezzük az átlagos hajtómű teljesítményt (P_{eng_i}), a repülőgép rendszereinek energiafelhasználását (P_{aux_i}), az akkumulátor rendszer hatásfokát (η_{elec}), egy biztonsági tényezőt (ζ_i) és a repülési időt (Δt_i):

$$E_{batt} = \sum_{i=1}^n (P_{eng_i} + P_{aux_i}) \cdot \eta_{elec} \cdot \zeta_i \cdot \Delta t_i \quad (4)$$

A szükséges hajtómű teljesítmény, elektromos motor teljesítmény, akkumulátor kapacitás, hajtómű tömeg, az akkumulátor és a szükséges tüzelőanyag kiszámolható. A felszálló tömeg (m_{to}) meghatározásához iteratív módon kell számítani a szerkezet tömegét (m_{struct}), hasznos terhet (m_{pay}), hajtómű tömegét (m_{eng}), a tüzelőanyag tömegét (m_{fuel}), akkumulátorok tömegét (m_{batt}), végül pedig az elektromos motort és rendszereit (m_{es}):

$$m_{to} = m_{struct} + m_{pay} + m_{eng} + m_{fuel} + m_{batt} + m_{es} \quad (5)$$

A project során a következő lépés a repülőgép [5] egyenletben szereplő tömegeinek meghatározása, mely során kiderül, hogy a hibrid konstrukció be tudja-e váltani a hozzá fűzött reményeket. Az elsődleges cél, az egy főgépről (gázturbináról) hajtott több elektromos motor – propeller konstrukció vizsgálata, melynek teljesítménysűrűsége egyértelműen jobbra adódik a hagyományos kiosztásokkal szemben. Viszont a szükséges akkumulátor tömeg vissza billentheti a mérleg nyelvét: ha annak tömege túl nagyra adódik, akkor már nem biztos, hogy érdemes lesz alkalmazni. A jövőben ezt az analízist kívánom végrehajtani.

ÖSSZEFOGLALÁS

E cikk, a „Disruptív technológiák kutatás-fejlesztése az e-mobility területén és integrálásuk a mérnökképzésbe” pályázattal egyetértésben egy olyan pilóta nélküli, hibrid hajtáslánccal rendelkező teherszállító légi jármű koncepcióját és a szükséges feltétel-/követelményrendszerét építi fel, mely képes az áruszállítás támasztotta körülményeknek megfelelni mind hasznos terhet, mind hatótávolság szempontjából. Ugyanakkor használatakor a jelenlegi technológiákhoz képest jóval kisebb környezeti terhelést okoz.

A munka során először röviden a légiszállítványozás trendjeit mutattam be, melyek bár sok hasonlóságot mutatnak az utasforgalom alakulásával, mégsem egyeznek azokkal, mivel más driverek, más inputok hatásai formálják. A hagyományos légiszállítványozási modellen belül egy olyan fázis célozható meg hibrid hajtású cargo UAV-val, amelyben jelenleg a közúti szállítványozás az egyeduralkodó. Ehhez bemutatattam a jelenleg használatos cargo UAV-kat, áttekintve előnyeiket, hátrányaikat, rámutatva arra, hogy miért van szükség új konstrukció kidolgozására. Ezután összegyűjtöttem, az e-cargo UAV-val szemben támasztott elvárásokat, melyek kiindulási alapjai lesznek a későbbi előzetes tervezési, méretezési számításoknak.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] Current Market Outlook 2016-2035. 2016, Boeing Company
- [2] Fehér Krisztina, Óvári Gyula: Alternatív tüzelőanyagok alkalmazásának realitásai a repülésben, a XXI. század első felében Repüléstudományi szemelvények 2017. NKE pp. 113-157. ISBN 978-615-5764-80-6 <http://www.repulestudomany.hu/kiadvanyok/RepSzem-2017.pdf>.
- [3] Growing Horizons 2017/2036, in Global Market Forecast. 2017, Airbus.
- [4] Moving Air Cargo Globally, in Air Cargo and Mail Secure Supply Chain and Facilitation Guidelines 2013, ICAO Security & Facilitation WCO.
- [5] Boeing, World Air Cargo Forecast, T. Crabtree, Editor. 2016.
- [6] IATA, Cargo Chartbook, Freight demand stays strong into H2, alongside a rising yield trend, Q3 2017, D. Oxley, Editor. 2017.
- [7] Office, F.D.o.T.A., Florida Air Cargo System Plan, Chapter 2, Air Cargo Trends and Overview, I. Wilbur Smith Associates, Editor. 2015.
- [8] Abbott, T.S., K.M. Jonse, M.C. Consiglio, D.M. Williams, and C.A. Adams, Small Aircraft Transportation System, Higher Volume Operational Concept: Normal Operations. 2004, NASA.
- [9] Peters, J.E., S. Seong, A. Bower, H. Dogo, A.L. Martin, and C.G. Pernin, Unmanned Aircraft Systems for Logistics Applications. 2012, Arroyo Center.
- [10] Sauvageau, B., K-MAX Cargo Unmanned Aerial System. 2011, NAVAIR Public Release Number 11-571: Kaman Aerospace, Lockheed Martin.
- [11] Morrison, M. Our top eight tiltrotor aircraft from concepts to one in-service success. 2015; Available from: <https://www.flightglobal.com/news/articles/our-top-eight-tiltrotor-aircraft-from-concepts-to-on-416183/>.
- [12] Momoh, O.D. and M.O. Omoigui. An overview of hybrid electric vehicle technology. in 2009 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. 2009.
- [13] Chen, K., A. Bouscayrol, A. Berthon, P. Delarue, D. Hissel, and R. Trigui, Global modeling of different vehicles. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2009. 4(2): p. 80-89.
- [14] Chan, C.C., The State of the Art of Electric and Hybrid Vehicles. Proceedings of the IEEE, 2001. 90(2): p. 247-275.
- [15] Bereczky, Á. and Z. Varga, Hibrid-, hibrid-elektromos járművek, hajtásrendszerek architektúrája, szabályozása, menedzsmentje és energiaforrások, in Motor és erőátviteli rendszerek mechatronikája, B. MOGI, Editor. 2014, BME MOGI: Budapest.
- [16] Kozár, A., Nagy hatótávolságú elektromos és hibrid-elektromos VTOL multirotor UAV megvalósíthatósági vizsgálata, in DAS. 2017, BME: Budapest. p. 102.
- [17] Solutions, C. Typical ISO (International Standards Organization) shipping containers. 2015; Available from: <http://containersolutions.net/specifications/>.
- [18] Boeing, Boeing 767 Airplane Description. 2005.
- [19] Group, A., Air freight ULD (Unit Load Devices) specifications. 2011.

DETERMINING THE REQUIREMENT SYSTEM OF A CARGO UNMANNED AERIAL VEHICLE WITH HYBRID PROPULSION SYSTEM

Recently, one of the fastest growing branches of the various segments of the aerospace industry is the development of unmanned aerial vehicles. Although, in the beginning the military industry gave the starting boost and continues to be the true pull force; the use of unmanned vehicles in its civilian use in the field of civilian use - in the absence of appropriate legal and regulatory frameworks - has now become more and more widespread. Thus, one of the promising uses of these air tools is their use as a cargo machine for specific purposes. The movement of goods is increasingly exaggerating in traditional manners (road, rail, water and conventional aviation). Together with the exponential increase in globalization, the more popular online stores and the achievement of shorter freight times yield for new technologies. In conjunction with the "Research and Development of Disruptive Technologies in e-mobility and Integration in Engineer Training", this article presents the concept and the required condition / requirement system for an unmanned cargo aircraft with hybrid propulsion system, capable of meeting the conditions of freight transport both useful load, in terms of range, but at the same time it has a much lower environmental burden than current technology.

Keywords: *hybrid propulsion, unmanned aircraft, UAV, cargo aircraft*

Bicsák György (MSc)
tanársegéd
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Vasúti Járművek Repülőgépek és Hajók Tanszék

gybicsak@vrht.bme.hu
orcid.org/0000-0002-3427-3918

Bicsák György (MSc)
Assistant lecturer
Budapest University of Technology and Economics
Department of Aeronautics Naval Architecture and
Railway Vehicles

gybicsak@vrht.bme.hu
orcid.org/0000-0002-3427-3918



http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2017_3/2017-3-13-0432_Bicsak_Gyorgy.pdf