

AVIOANE ELECTRICE: PROVOCĂRI, OPORTUNITĂȚI, REALIZĂRI, TENDINȚE ACTUALE, PERSPECTIVE DE VIITOR

Liviu DINCĂ¹, Jenica-Ileana CORCĂU^{1,2}, Andrei MARINESCU³

¹Universitatea din Craiova, Departamentul de Inginerie Electrică, Energetică și Aerospațială

²Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare Aerospațială “Elie Carafoli” I.N.C.A.S

³Academia de Științe Tehnice din România (ASTR), Craiova branch
ldinca@elth.ucv.ro¹, jcorcau@elth.ucv.ro^{1,2}, ancor2005@gmail.com²

Rezumat. Creșterea emisiilor de gaze cu efect de seră, precum și riscul de epuizare a carburanților fosili au determinat tranziția la transportul electric. Uniunea europeană își propune să reducă substanțial emisiile poluante până în 2035 prin utilizarea energiilor regenerabile. În transportul aerian această tranziție este mai dificilă în special datorită greutății echipamentelor imbarcate. Motoarele electrice clasice cu flux magnetic radial au fost înlocuite cu motoare cu flux magnetic axial cu greutate și volum redus, randament, putere și cuplu ridicat care au fost dezvoltate anterior pentru vehiculele electrice cu motoare în roți și sunt folosite fără modificări. În această lucrare se prezintă o vedere de ansamblu asupra principalelor probleme ridicate de propulsia electrică a aeronavelor. De asemenea, sunt prezentate câteva realizări importante obținute până în prezent și tendințe de dezvoltare în domeniu. În final, este studiată posibilitatea remotorizării unei aeronave de școală și antrenament cu propulsie electrică bazată pe un motor cu flux magnetic axial având ca sursă de energie o baterie LiIon Polimer.

1. INTRODUCERE

Provocarea actuală în aviație este de a reduce impactul asupra mediului prin reducerea consumului de combustibil fosil și a emisiilor eliberate CO₂ și mai ales NO_x. În anul 2019 emisiile globale de CO₂ datorate transportului aerian au reprezentat 5%, însă în urma recuperării post-Covid traficul aerian a crescut și după cum au preconizat experții cota aviației ar crește semnificativ. Proiecțiile sugerează ca ponderea aviației din emisiile globale de CO₂ ar putea crește până la 10% și, eventual, până la 24% până în 2050, cu excepția cazului în care se produce o schimbare tehnologică semnificativă [1]. Ca atare, decarbonizarea reprezintă principalul motiv din spatele dezvoltării aviației electrice. Un alt factor de poluare cauzat de avioane îl reprezintă zgomotul. Datorită creșterii traficului aerian se creează neplăceri populației urbane care locuiește în apropierea aeroporturilor. Nu în ultimul rând, trebuie să ținem cont și de creșterea prețurilor combustibililor fosili din ultimii zece ani.

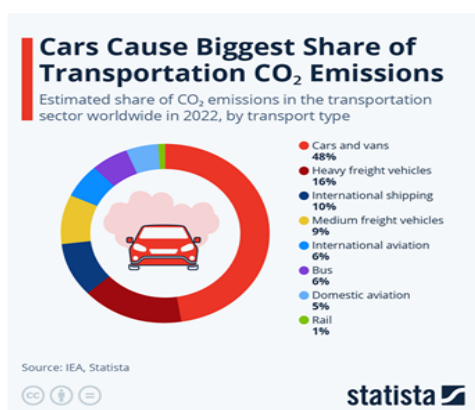


Fig. 1. Principalele surse de poluare

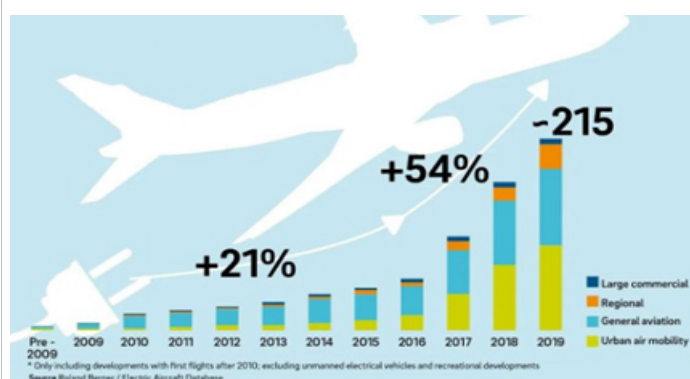


Fig. 2. Avioane cu propulsie electrică [1] în transporturi la nivelul anului 2022

Preocupările de mediu și cele economice pe care le-am menționat mai sus au determinat mai multe organizații de cercetare din lume să își stabilească anumite scopuri pentru industria aviației în ceea ce privește emisiile eliberate, consumul de combustibil, precum și zgomotul.

Un exemplu de schimbare importantă care are loc ca urmare a stabilirii scopurilor de reducere a arderii combustibilului și a emisiilor eliberate este tranziția către avioane electrice și propulsia electrică.

Perspectivile privind aviația electrică în anul 2022 sunt interesante, cu peste 200 de aeronave diferite în curs de dezvoltare la nivel mondial [1] (Fig. 2), multe dintre ele fiind cu design neconvențional. Sunt luate în considerare noi servicii de aviație care nu se încadrează în cadrul aviației existente. Dezvoltarea unei noi clase de aeronave mici, complet electrice, destinate pentru zboruri în jurul marilor zone metropolitane urbane a condus la conceptul Urban Air Mobility (UAM) [2]. Multe dintre aceste noi aeronave și servicii electrice vizează certificarea și intrarea în serviciu înainte de sfârșitul acestui deceniu.

O direcție de cercetare deschisă în vederea atingerii acestor deziderate este realizarea unor surse electrice bazate pe combustibili nepoluauți, o soluție fiind utilizarea pilelor de combustie cu hidrogen. Pe lângă componenta ecologică, un alt avantaj important al utilizării pilelor de combustie este oferit de randamentul lor, care este dublu față de cel al motoarelor termice actuale. Sistemele electrice cu pile de combustie ar putea deveni principala sursă de alimentare a avioanelor de mici dimensiuni sau ar putea înlocui sursele auxiliare de putere (APU) de pe aeronavele mari pentru a obține astfel avioane electrice.

Dintre avantajele pilelor de combustie menționăm: emisiile reduse, aproape zero, eficiență ridicată, modularitatea, reversibilitatea, fiabilitatea și funcționarea silențioasă. Pe lângă aceste avantaje menționăm și câteva provocări asociate cu aceste pile de combustie cum ar fi costul ridicat al pilelor de combustie având în vedere utilizarea platinei pe post de catalizator, problemele legate de extragerea hidrogenului verde, precum și siguranța.

2. AVIOANE ELECTRICE CU PILE DE COMBUSTIE

O sursă de energie studiată în prezent pentru utilizarea pe aeronave este hidrogenul stocat în rezervoare și transformat în electricitate de către pilele de combustie.

O echipă formată din mai mulți parteneri din Europa și condusă de German Aerospace Center (DLR) a dezvoltat avionul HY4 cu pile de combustie. După Antares DLR-H2 și Antares H3, HY4 este cea mai recentă versiune a unui avion alimentat cu pile de combustie și testat de DLR, figura 3a. Primul zbor a fost în anul 2016, [3]-[6]. În continuare German Aerospace Center (DLR) intenționează să dezvolte un avion de transport regional de 40 de pasageri utilizând aceeași soluție pentru sistemul de propulsie [7].

Un proiect similar cu HY4 este întreprins de compania ZeroAvia, care și-a propus ca până în anul 2024 să realizeze un avion electric comercial cu pile de combustie, figura 3b [2], [8], [9].

Un avion alimentat cu hidrogen este și Rapid 200-FC, construit în 2010 de Universitatea Politecnico di Torino împreună cu mai mulți parteneri din Europa. Sursa electrică este una hibridă formată dintr-o pilă de combustie de 20 kW și o baterie 20 kW Li-Po. Avionul a atins o viteză de croazieră de 135 km / h, figura 3c [10].

Hear Aerospace reprezintă o altă companie cu preocupări majore în aviația electrică. Compania a dezvoltat un avion regional numit ES-30, figura 3d. Avionul poate parcurge 200 km numai cu energie electrică. Noua aeronavă Hear are în prezent 250 de comenzi ferme [11].

UK își propune dezvoltarea rapidă a sectorului energetic bazat pe hidrogen lichid și construirea de aeronave subregionale (aprox. 400 km raza de acțiune) cu propulsie bazată pe hidrogen (fie motoare termice, fie pile de combustie).



Fig. 3a. Avionul HY4 [5]



Fig. 3b. Aircraft Zeroavia [8]



Fig. 3c. Avionul Rapid 200-FC [10]



Fig. 3d. Avionul ES 30 [11]

3. AVIOANE ELECTRICE CU BATERII

3.1 Avioane ușoare de antrenament

Pipistrel Velis Electro-One – avion ușor biloc deja comercializat, Fig. 4 [12]. Propulsie motor electric alimentat din baterii. Caracteristicile acestui avion sunt prezentate în tabelul 1 [12], [13]. Avionul e – SWAN, Fig. 5 [14], [15]. Avionul de producție românească SWAN cântărește 120 kg. Ideea dezvoltării acestui aparat a venit din lipsa aeronavelor accesibile, atât din punct de vedere financiar cât și din punct de vedere al obținerii unei licențe de zbor. Motor electric de 20 kW, 4.5 kg, controler motor 1.6 kg, 60 V, baterie de 7.68 kWh, 30 kg, durata de zbor 50 min, masa gol în configurație de decolare 140 kg, încărcătura maximă 120 kg [14], [15].

Tabelul 1.

Caracteristicile avionului Pipistrel Velis Electro-One

Parametrul	Valoarea	Parametrul	Valoarea
Sistemul de baterii			
Date Geometrice		Tensiune maximă	398 V
Anvergura	10.5 m	Capacitate utilizabilă a bateriei	20.0 kWh
Motor		Putere maximă cu o baterie deconectată	35 kW
Tip	PEM 60 MVLC	Mase	
Putere de vârf la decolare (max 1 min)	60 kW	Masa avionului gol cu sistem standard de baterii	379 kg
Putere maximă în regim continuu	50 kW	Masa maximă la decolare	550 kg
Controller motor		Performanțe	
Tip	H300A	Viteza de croazieră	157 km/h
Putere nominală	60 kW	Plafon practic	3900 m
		Durata maximă de zbor	1h



Fig. 4. Avionul Pipistrel Velis Electro-One [12], [13]



Fig. 5. Avionul de producție românească SWAN [15]

3.2 Motoplanoare

Diamond Electric, Fig. 6, primul zbor 20 iulie 2023, Certificat EASA/FAA se începe comercializarea. Este un avion biloc electric cu motor Safran Electrical & Power alimentat de la baterii produse de Electric Power Systems' (EPS), platforma de Diamond 40, soluție pur electrică. Durata de zbor 1.2 h, încărcătura utilă 200 kg, 2 – 3 locuri, autonomie 210 km [16].

Diamond HEMEP – Diamond împreună cu Siemens, Fig. 7, a realizat primul zbor în anul 2018. Primul avion din categoria cu propulsie hibridă serie. Configurație distribuită cu posibilitate de perfecționare a fiecărei componente în parte. Motor termic de 110 kW care acționează generatoarele a două sisteme electrice separate. Fiecare sistem electric compus din generator, inverter și motor electric. În fiecare sistem mai există o baterie de 12 kWh. Puterea totală a motoarelor la decolare 150 kW. Selectabil mod pur electric folosind energia din baterii, autonomia 30 minute, mod de croazieră – generatoarele dau toată energia la motor, mod de încărcare (generatorul încarcă bateriile). În sistem hibrid autonomie până la 5 ore. Este o perfecționare a avionului DA36 E-Star [17]. Diamond DA36 E-Star, realizat de Siemens alături de EADS și Diamond, Fig. 8 - Motoplanor biloc primul zbor 8 iunie 2011, propulsie hibridă serie. Motor de 70kW de la Siemens. Motor termic Wankel cu regim de putere constantă de 30 kW. Sistemul de baterii asigură suplimentul de putere în regim de decolare și urcare. Bateriile sunt încărcate în regim de croazieră [18].



Fig. 6. Motoplanorul Diamond [16]



Fig. 7. Motoplanorul Diamond HEMEP [17]



Fig. 8 Motoplanorul Diamond DA36 E-Star [18]

3.3 Avioane commuter

Electric Beaver DeHavilland, Fig. 9, este un avion de 6 locuri provenit din avionul firmei DeHavilland lansat în anul 1948 și remotorizat în varianta electrică. Propulsie motor MagniX cu flux magnetic axial alimentat din baterii. Se intenționează remotorizarea cu motor MagniX 500. Utilizat de compania Harbour Air care intenționează să își transforme flota de avioane Beaver în avioane electrice, primul zbor a avut loc la 19 August 2022, zbor de 45 de mile în 24 minute [19].

Avionul Eviation Alice, Fig. 10, este un avion de 9 locuri și 2 piloți. Primul zbor a avut loc în septembrie 2022. Două motoare de câte 850 CP, alimentate din baterii de 900 kWh, cu masa de 4000 kg, autonomie de 450 km cu rezerva de navigație de 30 min [20].



Fig. 9. Electric Beaver DeHavilland [19]



Fig. 10. Avionul Eviation Alice [20]

3.4 Avioane sportive pentru performanță

Evolito (Rolls Royce Spirit of Innovation), Fig. 11 - avion construit pentru record de viteză la avioane electrice. Avion monoloc, motor YASA de 400 kW, 6840 celule de baterii, tensiunea sistemului electric 750 V. Viteza maximă 555 km/h pe distanța a 3 km, 532 km/h pe distanța a 15 km [21]. Evolito utilizează noua tehnologie a motoarelor electrice cu flux magnetic axial (Axial Flux Technology) care permite zborul electric fără a utiliza reductoare între motor și elice. Directorul firmei Evolito spunea: „Construim viitorul zborului electric cu motoare care au cea mai mare putere și densități de cuplu, cu capacitatea de a fabrica la scară, obținând în același timp eficiențe de peste 98%” [21]. Evolito a fost echipat cu un motor de la firma YASA, (pionierul mondial al motoarelor electrice cu flux axial achiziționate de Mercedes-Benz în iulie 2021).

Aeronava Siemens Extra 330 LE. Bine cunoscutul avion de acrobație Extra 330 a fost echipat cu un motor electric produs de firma Siemens, dând posibilitatea de a urca la altitudinea de 3000 m în doar 4 min și 22 s, cu o viteză ascensională de 11.5 m/s (Fig. 12). A stabilit recordul mondial de viteză ascensională în noiembrie 2016, fiind recunoscut de Federația Aeronautică Internațională [21]. În Tabelul 2 sunt prezentați câțiva parametri ai aeronavei Siemens Extra 330 LE [21].

Firma Bye Aerospace are un program ambițios de dezvoltare a unei oferte de 3 aeronave electrice, cu 2, 4 și respectiv 6+2 locuri. Se intenționează certificarea acestor aeronave în scopul comercializării [22]. Datele tehnice ale aeronavei eFlyer 2 (Fig. 13) sunt prezentate în Tabelul 3 [22].



Fig.11. Evolito Rolls Royce [21]

Tabelul 2.

Datele tehnice ale aeronavei Siemens Extra 330 [21]

Parametrul	Valoarea
Anvergură	8 m
Suprafață portantă	10.84 m ²
Tensiunea bateriilor	580 V
Baterii	Stack 14 celule pe bază de Li
Capacitate baterii	18.6 kWh
Motor	SP260D
Putere motor	260 kW
Greutate motor	50 kg



Fig. 12. Avionul Siemens Extra 330 E

Tabelul 3

Datele tehnice ale aeronavei eFlyer 2

Parametru	Valoarea
Tip motor	ENGINEUS 100 110 kW
Răcire motor	aer
Baterii	Litium de mare densitate
Structură	Compozite pe bază de carbon
Număr locuri	2
Încărcătură utilă	225 kg
Domeniu de viteze	97 - 245 km/h
Rază de acțiune la 3300 m și 173 km/h	396 km
Durată maximă de zbor	3 ore la 131 km/h
Plafon practic	Aprox. 3500 m



Fig. 13. Avionul eFlyer 2

4. VARIANTE POSIBILE PENTRU PROPULSIA ELECTRICĂ

Sistemele electrice de propulsie în aviație, care au pornit de la utilizarea mini motoarelor electrice pentru propulsia aeromodelelor și UAV-urilor de mici dimensiuni, s-a dezvoltat pe două direcții, ambele menționate mai sus: utilizând ca sursă de energie baterii sau pile de combustie. Există diferite configurații ale sistemelor de propulsie electrice, o parte din ele sunt prezentate în Fig. 14 [23].

Un exemplu de sistem de propulsie electrică este prezentată în Fig. 15 în care pila de combustie este sursa de energie. Aceasta este arhitectura clasică a unui sistem de propulsie bazat pe pile de combustie utilizat pe UAV-uri [24]. Există și două posibilități de configurații hibride în serie și în paralel, ca în Fig. 16 [24].

5. REMOTORIZAREA ELECTRICĂ A UNUI AVION DE ANTRENAMENT

Având în vedere cercetările intense în direcția realizării de sisteme de propulsie electrice pentru aeronave, desfășurate la nivel mondial, o echipă de specialiști în domeniul electric și aeronautic din Craiova își propune să realizeze un avion cu propulsie electrică. Prezentăm aici câteva considerații privind posibilitățile de realizare a unui astfel de avion pornind de la unele capacități deja existente în zona Craiova.

Cea mai avantajoasă posibilitate, care ar duce la costuri mai scăzute este utilizarea unei aeronave deja existente și modificarea doar a sistemului de propulsie. În acest sens se poate valorifica experiența existentă la Baza de Reparații a Aeroclubului României, existentă la Craiova. În cadrul Aeroclubului României există aeronave susceptibile de a fi transformate pentru o propulsie electrică. Aeronava selectată pentru acest studiu este de tip ZLIN 142, prezentată în Fig. 17. Câteva date tehnice ale acestei aeronave sunt prezentate în Tabelul 4.

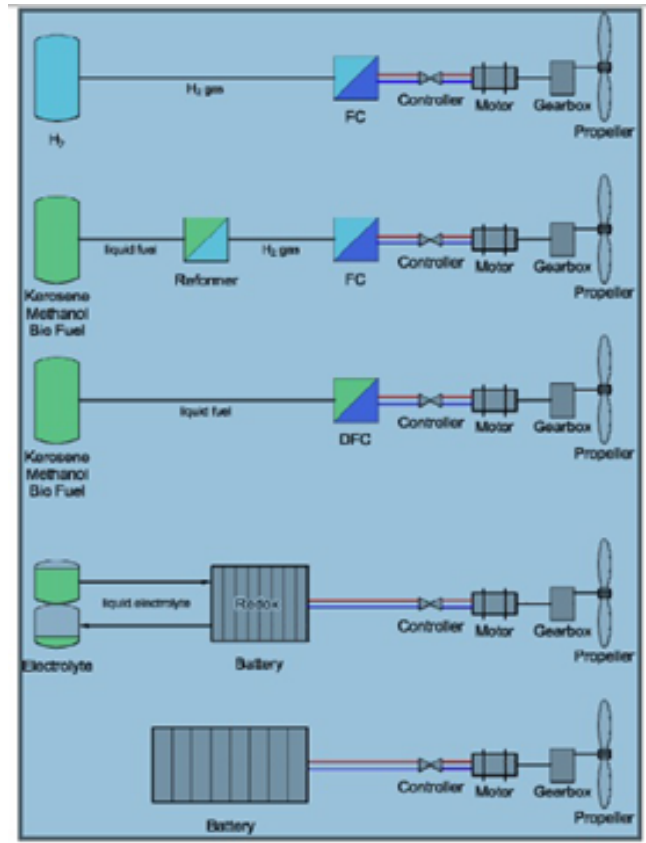


Fig. 14. Posibile sisteme de propulsie pe avioane [23]

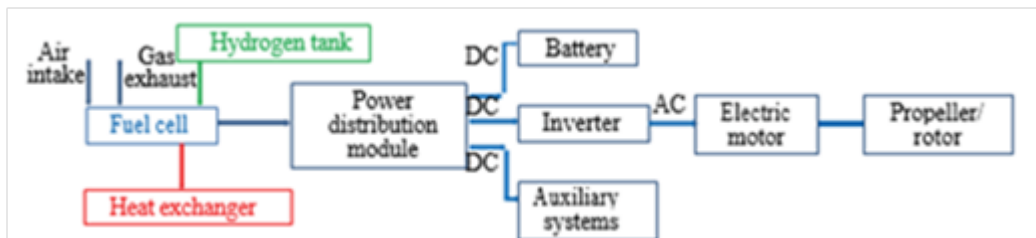


Fig. 15 Sistem de propulsie electrica bazat pe pila de combustie [24]

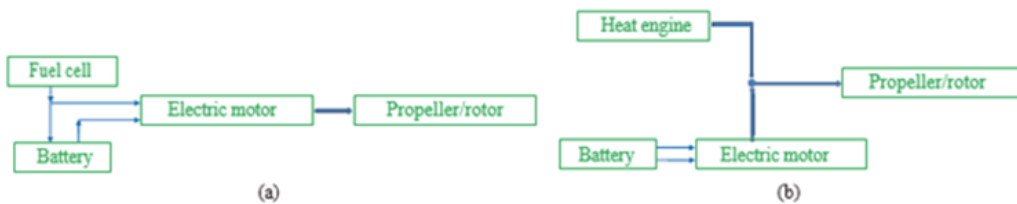


Fig. 16. Sistem de propulsie hibrid a serie, b. paralel [24]

Utilizând datele din Tabelul 4 se poate face o estimare a polarei $C_z(C_x)$ a acestei aeronave.

Deoarece elicea este o elice cu pas variabil, turația menținându-se aproximativ constantă (variație de aproximativ 10% între regimul de croazieră și cel maximal), se poate considera că randamentul elicei este constant, de aproximativ 0.75. Elicele cu pas variabil se proiectează astfel încât pe întreg domeniul de viteze de zbor să se mențină o turație constantă și un

randament apropiat de randamentul maxim al elicei. Un randament maxim bun pentru elicele cu pas variabil este în jurul valorii de 0.75.



Fig. 17. Aeronava ZLIN 142 [28]

Tabelul 4

Datele tehnice ale aeronavei ZLIN 142 [28]

Anvergura	9.16 m	Putere nominală motor	154 kW/210 CP
Lungime	7.33 m	Greutate motor	96.7 daN
Înălțime	2.75 m	Putere la decolare	154kW/210 CP
Suprafața portantă	13.2 m ²	Putere la viteză maximă	125 kW/170 CP
Viteza de stall	89 km/h	Putere în croazieră	103 kW/140 CP
Viteza de croazieră	170 km/h	Turație la decolare	2750 rpm
Viteza maximă	230 km/h	Turație la viteză maximă	2600 rpm
Viteza ascensională	330 m/min	Turație în croazieră	2400 rpm
Plafon practic	5000 m	Elice	Avia V503 bipala
Distanța maximă de zbor	941 km	Diametru elice	2 m
Masa gol	730 kg	Capacitate combustibil	125 l/230 l
Masa maximă la decolare	1090 kg		

Având în vedere relația [29]

$$P_{propulsie} = P_{arbore} \eta_{elice} \quad (1)$$

Se poate estima puterea de propulsie în regim de viteză maximă și regim de croazieră. Utilizând coeficienții aerodinamici, puterea de propulsie se poate scrie sub forma

$$P_{propulsie} = \rho V^3 S C_x / 2 \quad (2)$$

Deci utilizând relațiile (1) și (2) se poate determina coeficientul de rezistență la înaintare C_x pentru cele două regimuri de zbor – croazieră și viteză maximă.

Coeficientul de portanța pentru cele două regimuri de zbor se poate estima din relația:

$$L = \rho V^2 S C_z / 2. \quad (3)$$

având în vedere ca portanța L trebuie să fie egală cu greutatea avionului în zbor orizontal. Se pot deci determina două puncte de pe polara C_z (C_x), cu ajutorul datelor din Tabelul 4.

Din aerodinamica se cunoaște faptul ca polara C_z (C_x), pentru incidențe sub incidența teoretică este dată de relația:

$$C_x = C_{x0} + K C_z^2. \quad (4)$$

Cunoscând cele două puncte de pe polară determinate anterior se pot determina C_{x0} și K , astfel încât să fie cunoscută polara C_z (C_x). Polara estimată este prezentată în Fig. 18.

Utilizând relațiile 2 și 3 se poate determina dependența $P(V)$ pentru avionul ZLIN 142, Fig. 19a. Momentul la arbore determinat din relația (5) este prezentat în Fig. 19b.

$$M_{arbore} = P_{arbore} / \Omega. \quad (5)$$

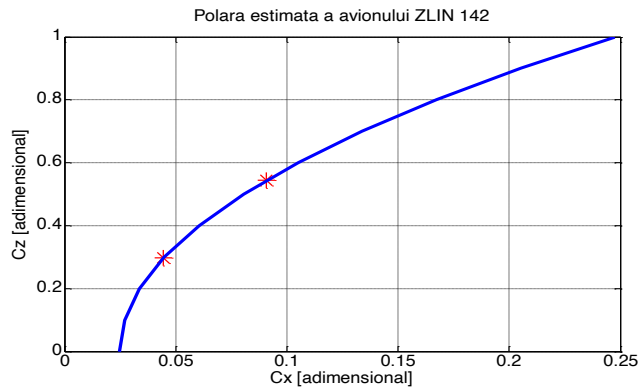
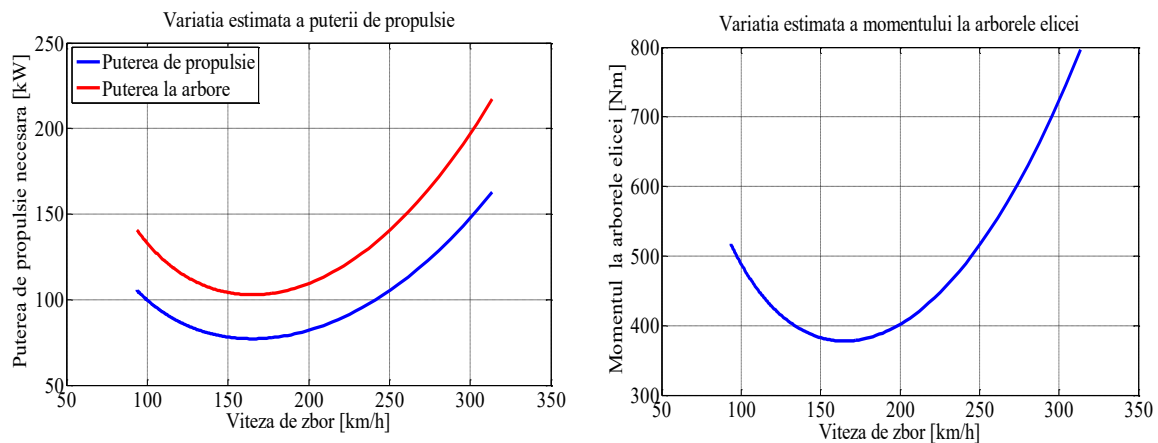


Fig. 18. Polara C_z (C_x) estimata a avionului ZLIN 142



a

b

Fig. 19. a. Puterile estimate; b. Momentul la arbore estimat

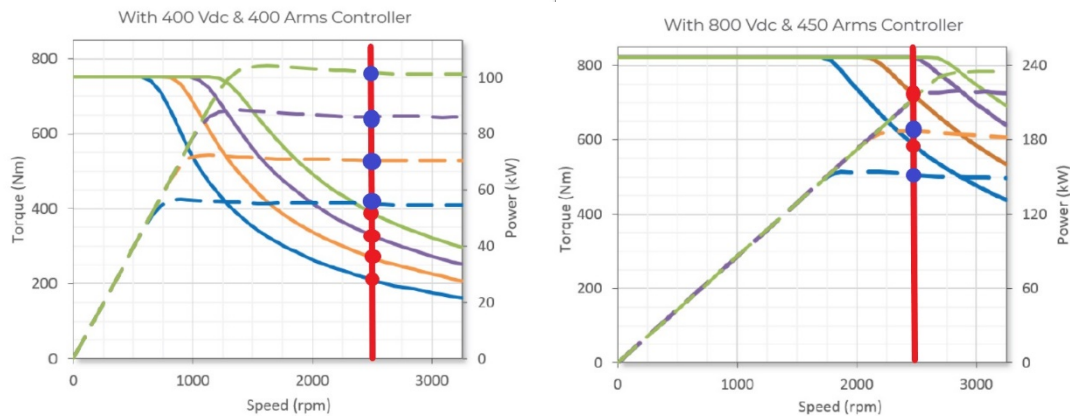


Fig. 20. Caracteristicile motorului YASA 750 R [30]

În documentația motorului YASA 750 R [30] sunt prezentate caracteristicile acestui motor pentru alimentare cu un controller de 400 V /400 A și pentru un controller de 800 V/450 A. Aceste caracteristici sunt prezentate în Fig. 20.

Pentru a păstra aceeași elice este necesar ca motorul să funcționeze aproximativ la turația de 2500 rpm și să furnizeze momentul la arbore cerut de elice, prezentat în Fig. 19.b. Se observă că în cazul controllerului de 400 V/400 A, un singur motor nu poate obține momentul la arbore necesar, la turația de 2500 rot/min, dar acest tip de motor permite a se monta foarte ușor mai multe motoare pe același arbore (spre exemplu aeronava Evolito de la Rolls Royce are trei astfel de motoare montate pe arborele elicei). În varianta cu controller de 800V/450 A momentele la arbore pot atinge valorile necesare. Se pune problema alegerii variantei convenabile. Două motoare înseamnă dublarea greutateii pentru

(motor+controller+invertor), varianta cu controller de 800V/450 A înseamnă invertor pentru tensiunea de 800 V sau baterii de 800 V. De obicei, bateriile cu tensiuni mai mari sunt mai grele.

Deci din punctul de vedere al motorului, se poate spune ca realizarea sistemului de propulsie electric pentru avionul ZLIN 142 este posibil.

Prezentăm în continuare o estimare a celor două variante în ceea ce privește puterea absorbită din baterii.

Tabelul 5.

Momentul la arbore și puterea absorbită pentru cele două variante de controller				
Două motoare la 400 V/400 A, 2500 rpm			Un motor la 800 V/450 A, 2500 rpm	
Moment la arbore per motor [Nm]	Putere per motor [kW]	Putere 2 motoare [kW]	Moment la arbore [Nm]	Putere [kW]
210	55	110	590	150
275	70	140	725	190
325	87	174	820	215

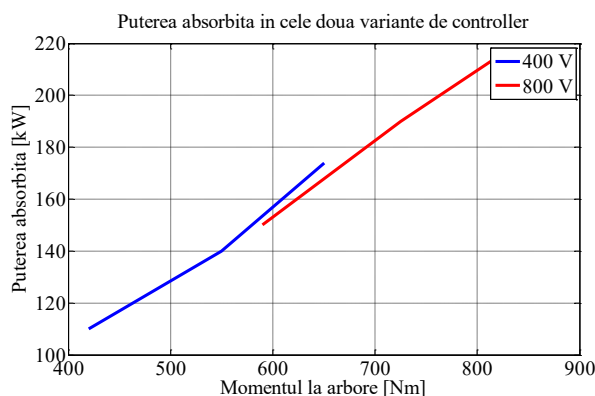


Fig. 21. Puterea absorbită de motoare în cele două variante de controller

Se observă că din punctul de vedere al puterii absorbite diferența dintre cele două variante nu este semnificativă pe domeniul de momente la arbore pe care se suprapun, dar varianta cu două motoare montate pe același arbore, alimentate la 400 V acoperă mai bine domeniul de momente la arbore necesare. Deci se pare ca aceasta este varianta mai avantajoasă, deși presupune dublarea greutateii motorului și a controlerului. Această diferență ar putea fi compensată din greutatea mai mică a bateriilor de 400 V față de cele de 800 V.

În ceea ce privește necesitatea de energie de la bord, facem o estimare pentru un zbor de croazieră de 30 min, luând în considerație și faza de decolare de aproximativ 2 min. Astfel, în faza de decolare puterea absorbită este de 154 kW, conform fișei avionului. Aceasta înseamnă pentru o durată de 2 min o energie 5.15 kWh. Zborul în regim de croazieră nu poate începe imediat după decolare deoarece este necesar să se atingă viteza de croazieră. Astfel că mai considerăm o perioadă de 5 min de accelerare, în care puterea scade de la 150 kW la 105 kW, deci o valoare medie de 127.5 kW. Această valoare medie pentru o perioadă de 5 minute necesită o energie de 10.6 kWh. Pentru restul de 23 de minute, se consideră zbor de croazieră cu puterea de 105 kW, deci un total de 40.25 kWh. Per total zbor rezultă o energie necesară de 56 kWh. Se poate spune ca aceasta ar fi o cerință minimală pentru un zbor de 30 min, având în vedere ca avionul nu realizează în acest zbor decât zbor de croazieră și nicio altă evoluție. Pentru ca avionul să poată executa un zbor rezonabil, se poate spune că ar fi necesară o baterie de 80 kWh. La o densitate de putere de 200 Wh/kg cât este uzuală pentru baterii de propulsie pentru aviație în prezent ar fi necesară o masă de aproximativ 400 kg pentru baterii.

În Tabelul 5 se specifică o masă a avionului gol de 730 kg, din care s-ar putea scădea greutatea motorului de 100 kg. Aceasta înseamnă o greutate a structurii de aproximativ 630 kg. Adăugând bateria de 400 kg și două motoare de câte 37 kg plus controlerul estimat la câte 20 kg, se ajunge la o masă totală a avionului de 1144 kg, fără echipaj, în condițiile în care masa

maximă la decolare a avionului la decolare este de 1090 kg. O speranță ar fi utilizarea de baterii de ultimă generație anunțate de firma CATL în [31], cu o densitate de putere de 500 Wh/kg. Aceasta reprezintă o reducere a masei bateriilor la 160 kg, deci un total pentru avionul fără echipaj de 904 kg. Aceasta ar însemna ca avionul să zboare cu un singur pilot pentru a se încadra în masa maximă la decolare.

Avioane cu propulsie electrică au fost realizate cu puteri începând de la 20 kW. Puterile necesitate de avionul ZLIN 142 sunt mari și datorită faptului că este un avion conceput pentru viteza mai mare de zbor cu capabilități de acrobație și antrenament. Este interesant de studiat pe viitor fie motorizarea unui avion din aceeași categorie, dar cu structura modernă mult mai ușoară, fie motorizarea unui avion din categoria agrement, cu viteze de zbor mai reduse, pentru care necesitățile de putere de propulsie și de energie stocată la bord sunt mult mai reduse.

În Tabelul 6 este prezentată o comparație între avionul ZLIN 142 cu propulsie termică și cel propus spre studiu, cu propulsie electrică.

Tabelul 6.

Comparație între avionul ZLIN cu propulsie termică și cu propulsie electrică			
Propulsie termică		Propulsie electrică	
Parametrul	Valoarea	Parametrul	Valoarea
Masa avionului gol	730 kg	Masă avion gol	630 kg
Masa motorului	100 kg	Masă motoare	2x37 kg
Masă combustibil	200 kg	Masă baterie	400 kg
		Masă controllere	2x20 kg
		Masă sistem de răcire motor	10 kg
Masa totală fără pilot	930 kg	Masă totală fără pilot	1154 kg
Durata zbor de croazieră	5h30 min	Durata zbor de croazieră	30 min
Densitate de putere motor	1.54 kW/kg	Densitate de putere motor electric cu flux axial	2.7 kW/kg
Densitate de energie kerosen	12.5 kWh/kg	Densitate de energie baterii	200 Wh/kg

În concluzie, putem spune ca prin estimările făcute în acest studiu, chiar utilizând motoarele electrice cu flux magnetic axial de ultima generație, posibilitățile de electrificare a propulsiei unui astfel de avion sunt limitate. Pentru a obține rezultate superioare este necesară motorizarea unui avion cu structura modernă din fibra de carbon. Avioane moderne din aceeași categorie cu ZLIN 142 au masa structurii din fibra de carbon de aproximativ 300 kg, ceea ce ar face posibilă motorizarea de tipul celei studiate aici.

CONCLUZII

Electrificarea propulsiei aeronavelor este cu certitudine o soluție importantă în ceea ce privește scăderea nivelului de emisii de noxe la nivel global. Studiile în prezent se îndreaptă pe două direcții principale: creșterea capacității bateriilor utilizabile în aviație și utilizarea hidrogenului ca sursă de energie. Problema realizării unor motoare electrice cu densitate de putere compatibile cu cele de aviație a fost rezolvată odată cu apariția motoarelor electrice sincrone cu flux magnetic axial. Realizarea unor avioane cu propulsie electrică cu performanțe fiabile este în continuare o problemă de îmbinare a posibilităților oferite de structurile moderne cu posibilitățile oferite de sistemele de propulsie electrică destinate aviației.

Deși pare o soluție mai ieftină, electrificarea propulsiei unei aeronave mai vechi, așa cum s-a procedat cu DeHaviland Beaver, are posibilități foarte limitate, ducând la scăderea drastică a duratei de zbor și a sarcinii utile a avionului. Aceste concluzii rezultă și din studiul nostru. Ca urmare în stadiul actual al electrificării aparatelor de zbor, reducerea greutății structurii aparatelor prin folosirea unor materiale ușoare (de exemplu fibra de carbon) este imperios necesară.

CONFIRMARE

Lucrarea a fost prezentată la Simpozionul de Mașini Electrice SME'XIX, ediția 2023.

BIBLIOGRAFIE

1. L. Shadbolt, *Technical Study Electric Aviation in 2022*, HDI Global Specialty Study Electric Aviation, April 2022.
2. S. Nicolay, S. Karpuk, Y. Liu, A. Elham, *Conceptual design and optimization of a general aviation aircraft with fuel cells and hydrogen*, International Journal of Hydrogen Energy, **46**, 2021, 32676-32694.
3. T. Kim, S. Kwon, *Design and development of a fuel cell powered small unmanned aircraft*, Int J Hydrogen Energy 2012; *1*, 615e22.
4. ***<https://www.h2fly.de/2023/09/07/h2fly-and-partners-complete-worlds-first-piloted-flight-of-liquid-hydrogen-powered-electric-aircraft/>.
5. ***<https://www.designboom.com/technology/hy4-aircraft-hydrogen-electric-world-record-flying-7000-feet-05-31-2022/>.
6. ***<https://robbreport.com/motors/aviation/h2fly-hy4-electric-aircraft-1234893415/>
7. ***<https://fuelcellworks.com/news/new-dlr-hy4-the-first-hydrogen-powered-aircraft-debuts-at-stuttgart-airport/>
8. ***<https://www.prnewswire.com/news-releases/zeroavia-makes-aviation-history-flying-worlds-largest-aircraft-powered-with-a-hydrogen-electric-engine-301726022.html>
9. ***ZeroAvia, Inc.. The first practical true zero emission aviation powertrain. <https://www.zeroavia.com>.
10. ***<https://ecofriend.com/enfica-fc-s-rapid-200-fc-electric-aircraft-sets-speed-and-endurance-records.html>.
11. ***<https://www.aviationtoday.com/2023/06/12/electric-aviation-continues-to-progress-in-2023>.
12. ***<https://www.pipistrel-aircraft.com/products/velis-electro/>.
13. ***https://en.wikipedia.org/wiki/Pipistrel_Velis_Electro
14. ***<https://www.youtube.com/watch?v=QnJnxEIzs4A>.
15. ***<https://www.aopa.ro/articole/avionul-romanesc-swan-isi-face-debutul-la-aero-2015-primele-imagini-oficiale.html>
16. ***<https://www.diamondaircraft.com/en/about-diamond/newsroom/news/article/maiden-flight-of-the-diamond-aircraft-eda40/>
17. ***https://www.airtn.eu/downloads/2015-06-30_airtn_nextgen_hemep.pdf
18. ***<https://www.diamondaircraft.com/en/about-diamond/newsroom/news/article/diamond-aircraft-proudly-presents-the-worlds-first-serial-hybrid-electric-aircraft-da36-e-star/>.
19. ***<https://harbourair.com/harbour-airs-all-electric-aircraft-operates-first-point-to-point-test-flight/>.
20. ***<https://insideevs.com/news/676120/eviation-electric-airplane-ceo-talk/>.
21. ***<https://www.designboom.com/technology/rolls-royce-spirit-of-innovation-worlds-fastest-all-electric-aircraft-03-10-2022/>
22. ***<https://byeaerospace.com/>.
23. M. Hepperle, *Electric Flight – Potential and Limitations*, STO-MP-AVT-209, NATO, UNCLASSIFIED
24. Ó.González-Espasandín, T.J. Leo, and E. Navarro-Arévalo, *Fuel Cells: A Real Option for Unmanned Aerial Vehicles Propulsion*, Hindawi Publishing Corporation The Scientific World Journal Volume 2014.
25. *** Eviation Selects Electric Propulsion Leader magniX to Support Development of First All-Electric Plane <https://www.aviationpros.com/aircraft/business-general-aviation/press-release/21077293/eviation-selects-electric-propulsion-leader-magnix-to-support-development-of-first-all-electric-plane>
26. ***<https://evolito.aero/about/>.
27. ***<https://www.fuelcellstore.com/g-hfcs-5kw66v-5000w-hydrogen-fuel-cell-power-generator>.
28. ***EASA Type Certificat Data Sheet for ZLIN Z 42 Series - EASA A.027 Issue 9, 18.08.2020.
29. L. Dinca, J.I Corcău, *Mecanica si dinamica zborului avionului*, Editura Universitaria, pag. 335, Craiova, 2018.
30. *** YASA 750 R electric motors – product sheet.
31. *** <https://newatlas.com/energy/catl-500-wh-kg-condensed-battery/>.